

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Ing. Michal Šofer

**POPIS DEGRADACE POVRCHU KONSTRUKČNÍCH
PRVKŮ VLIVEM OPAKOVANÉHO KONTAKTNÍHO
ZATÍŽENÍ**

**DESCRIPTION OF SURFACE DEGRADATION OF
CONSTRUCTION COMPONENTS DUE TO REPEATED
CONTACT LOADING**

autoreferát doktorské disertační práce

Školící pracoviště: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní, katedra mechaniky

Školitel: doc. Ing. Leo Václavek, CSc.

Obor: 3901V003 Aplikovaná mechanika

Oponenti: prof. Ing. Liří Lenert, CSc.
VŠB-TU Ostrava

Ing. Petr Matušek, CSc.
BONATRANS GROUP a.s.

doc. Ing. Roland Jančo, Ph.D.
STU Bratislava

Ostrava 2012

© Michal Šofer

ISBN 978-80-248-2881-7

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předložená disertační práce se věnuje predikci ratchetingu v oblasti kontaktní únavy pro případ liniového kontaktu. Pro uvedené účely je použit model opotřebení, navržený A. Mazzuem, který je založen Chabocheově modelu plasticity s kombinovaným pravidlem zpevnění a následně implementován do shear band cracking mechanismu opotřebení. Algoritmus byl v první fázi napsán v jazyce APDL (Ansys Parametric Design Language), posléze byl však z důvodu vyšší efektivity a možností jeho rozšíření převeden do jazyka C#, kde plně využívá výhod objektového programování. Druhá část disertační práce se věnuje nově navržené metodice identifikace materiálových konstant prostřednictvím inverzního algoritmu. Daný přístup je poté verifikován na konkrétním, dříve realizovaném, experimentu na autorově pracovišti. V závěru disertační práce se autor věnuje dvěma aplikacím Mazzuova algoritmu, konkrétně jeho rozšíření pro simulaci případů s proměnným maximálním kontaktním tlakem a vlivu zbytkových napětí na míru opotřebení.

ANNOTATION OF Ph.D. THESIS

Proposed dissertation thesis deals with ratcheting prediction in the field of contact fatigue for the case of line contact. For the stated purposes, the wear model proposed by A. Mazzu is used. Mazzu's model is based on Chaboche plasticity model with combined hardening rule and afterwards implemented into shear band cracking wear mechanism. In the first stage, the entire algorithm has been written in APDL program language (Ansys Parametric Design Language). However afterwards, it was due to the higher efficiency and the possibility of its extension rewritten into C # program language, where takes full advantage of object-oriented programming. The second part of the thesis deals with the newly proposed methodology for identification of material constants by inverse algorithm. The given approach is then verified on a specific, previously realized, experiment on the author's workplace. At the end of the thesis, the author devotes to two applications of Mazzu's algorithm, concretely its extension for simulation of cases with variable maximum contact pressure and the influence of residual stress on the wear rate.

Obsah

1	Úvod	4
2	Současný stav řešené problematiky	4
3	Cíle disertační práce	6
4	Experimentální zázemí pro zkoušky v oblasti kontaktní únavy na autorově pracovišti	7
5	Prezentace experimentálních výsledků na autorově pracovišti	8
5.1.	Vliv drsnosti povrchu na evoluci opotřebení a výzkum iniciační fáze defektů pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T	8
5.2.	Vliv historie zatěžování na odolnost proti opotřebení pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T	10
6	Predikce plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem pro případ liniového kontaktu s využitím Mazzuova přístupu	11
6.1.	Predikce plastické smykové deformace s využitím Mazzuova algoritmu	11
7	Shear band cracking mechanismus	13
8	Identifikace materiálových parametrů	14
9	Predikce opotřebení s využitím Mazzuova algoritmu	16
10	Aplikace Mazzuova algoritmu	19
10.1.	Studie použitelnosti Mazzuova algoritmu pro různé případy liniového kontaktu	19
10.2.	Vliv zbytkových napětí na akumulaci plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem	22
11	Závěr	26
12	Přínos disertační práce a možnosti dalšího rozvoje	27
13	Seznam použité literatury	29
	Seznam vlastní literatury	30
	Spoluúčast na tvorbě funkčních vzorků	32
14	Conclusions	33

Seznam použitého značení

a	[mm]	velikost kontaktní plochy
b_1	[1]	koeficient izotropního zpevnění Chabocheova modelu
b_2	[1]	koeficient izotropního zpevnění Chabocheova modelu
C	[Pa]	materiálová konstanta Chabocheova modelu
d_{kon}	[mm]	koncový průměr vzorku
$error$	[1]	chyba
f	[1]	trakční koeficient
h_d	[mm]	úbytek průměru
h_W	[mm]	úbytek poloměru
h_{Wref}	[mm]	referenční úbytek poloměru
m_W	[g]	naměřený hmotnostní úbytek
m_{CW}	[g]	celkový naměřený hmotnostní úbytek
N	[1]	počet cyklů
N_{ref}	[1]	referenční počet cyklů
p_0	[MPa]	maximální velikost kontaktního tlaku
R	[MPa]	izotropní proměnná
R^2	[1]	koeficient determinance
R_∞	[MPa]	materiálová konstanta Chabocheova modelu
$R_{\infty 1}$	[MPa]	materiálová konstanta Chabocheova modelu
$R_{\infty 2}$	[MPa]	materiálová konstanta Chabocheova modelu
s_{poc}	[mm]	počáteční šířka vzorku
s_{kon}	[mm]	koncová šířka vzorku
X_{xz}	[Pa]	složka kinematického tenzoru
ε_c	[1]	celková deformace
γ	[1]	materiálová konstanta Chabocheova modelu
$\Delta\gamma_{xz}$	[1]	přírůstek plastické smykové deformace
γ_{xz}	[1]	smyková deformace
γ_{crit}	[1]	kritická hodnota plastické smykové deformace
ρ	[kg/m ³]	hustota
σ_L	[MPa]	napětí na mezi kluzu
σ_x	[Pa]	normálové napětí ve směru osy x
τ_{xz}	[MPa]	smykové napětí

1 Úvod

Predikci a výpočtem opotřebení pro případ jak liniového, tak i bodového kontaktu se v současné době zabývá řada pracovišť po celém světě. Důvodů bychom mohli nalézt hned několik, tím hlavním je bezesporu pochopení procesu opotřebení a akumulace plastických deformací pod kontaktním povrchem s cílem prodloužit životnost strojních součástí, například železničních dvojkolí či opěrných válců válcovací stolice.

V současné době se u uvedených aplikací pro optimalizaci intervalu mezi reprofilacemi vychází z dlouhodobých praktických zkušeností, případně defektoskopického zkoumání (NDT metody). V praxi se rovněž využívá poznatků z realizovaných experimentů na zkušebních zařízeních určených pro výzkum valivé kontaktní únavy resp. opotřebení. V následném výpočtovém procesu se používají jednoduché postupy pro oblast liniového kontaktu, založené na Archardově zákoně. Použití MKP simulací pro predikci opotřebení je v současné době časově náročná varianta. Z tohoto důvodu není možné simulovat tisíce až milióny cyklů valení v akceptovatelném časovém rozmezí. Na straně druhé, v současnosti existuje rovněž řada analytických či semi-analytických metod, které, byť s určitými omezeními, jsou schopny danou problematiku řešit. Popis vzájemné interakce mezi železničním kolem a kolejnicí je tedy i v současné době velice komplikovaný a v mnoha oblastech neprobádaný fenomén.

2 Současný stav řešení problematiky

Vlivem vzájemné interakce funkčních povrchů dochází v povrchových vrstvách k proměnlivým elastickým nebo elastoplastickým deformacím, které mohou v závislosti na velikosti působícího smykového napětí vyvolat lokalizovanou nízkocyklovou nebo vysokocyklovou únavu. Průběh chování kovových materiálů při cyklickém zatěžování je rozličný. Jejich chování je možné rozdělit do čtyř základních skupin [16]:

1. Dokonale pružné – elastické

Mez úměrnosti není překročena v žádném zátěžném cyklu a lze předpokládat, že nedojde k porušení.

2. Elastické přizpůsobení – elastic shakedown

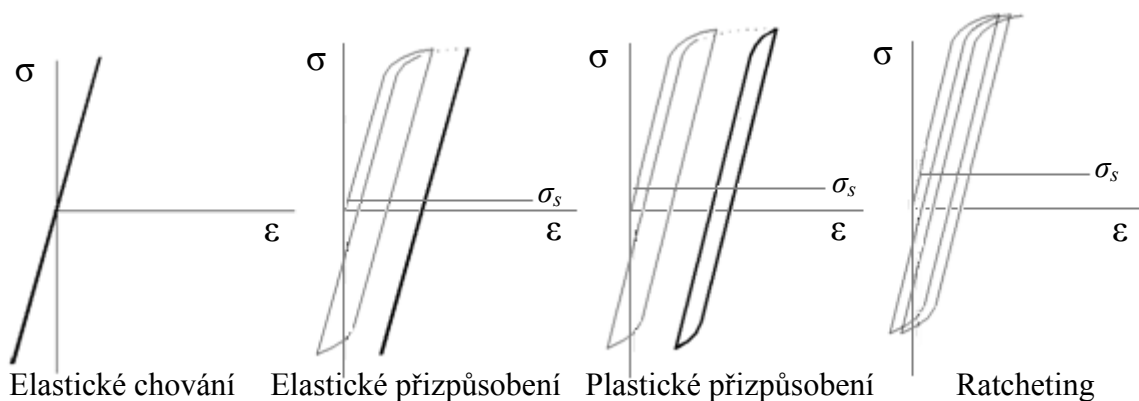
Plastická deformace se objevuje v prvních cyklech zatěžování, v následujících cyklech je však chování materiálu elastické. Může dojít k porušení vlivem vysokocyklové únavy

3. Plastické přizpůsobení – plastic shakedown

Chování materiálu je v tomto případě charakterizováno hysterezní smyčkou v závislosti napětí-deformace. Vede k porušení nízkocyklovou únavou.

4. Cyklické tečení – ratchetting

Postupným nárůstem plastické deformace může dojít k vyčerpání plastických schopností materiálu (delaminaci). Cyklické tečení je závažné zejména u součástí, které pracují za vysokých teplot, kdy dochází k superpozici vysokoteplotního creepu a únavy.



Obrázek 1: Čtyři základní typy chování materiálu

Studium vzájemné interakce povrchů kolejnice a železničního kola je i v současné době stále velmi komplexním problémem, zahrnujícím množství fenoménů, jakými jsou například zpevnění materiálu povrchových a podpovrchových vrstev, distribuce zbytkových napětí a v neposlední řadě růst trhliny, řízený faktorem intenzity napětí, který je realizován především za přítomnosti vody jako maziva v kontaktní ploše [1].

Důkazem komplexnosti tohoto problému je existence ne mnoha teorií, které podrobně popisují vztah mezi opotřebením a kontaktní únavou. Tyfour a kol. [2] například dokazují vzájemnou spojitost mezi opotřebením, ratchetingem a zpevněním materiálu, které dosáhnou ustáleného stavu v případě, že vrstvy materiálu dostávající se na povrch vlivem postupného opotřebením vykazují stejnou historii plastizace.

Fletcher a Beynon [3] za stejných zkušebních podmínek vypožorovali rovnováhu mezi růstem trhliny a mírou opotřebením. Samotný růst trhliny je zde popsán jako sled dvou mechanismů: mechanismus iniciace trhliny v důsledku ratchetingu, následovaný mechanismem šíření v důsledku smykových napětí. K nukleaci trhliny dochází v případě vyčerpání plastických schopností materiálu, jinými slovy dojde k dosažení kritické hodnoty akumulované plastické deformace [4]. Nukleované trhliny mohou růst pouze v malé délce, ve většině případů rovnoběžně s povrchem, které posléze způsobují odlupování materiálu ve tvaru vloček – delaminační opotřebení [5]. Rovněž může docházet k růstu trhliny směrem k povrchu vzorku/kola, což má za následek utváření základních podmínek pro vznik kontaktní únavy [6].

Merwin a Johnson [7] poukazují na ortogonální smykovou deformaci γ_{xz} (souřadnice x je rovnoběžná s povrchem, souřadnice z je kolmá na povrch), která může být jako jediná akumulována v procesu opakovaného kontaktu zkušebních těles. Na základě tohoto předpokladu jsou zanedbány všechny složky napětí krom smykového napětí τ_{xz} .

Na přelomu 80 a 90 let uveřejnili Bower a Johnson [8] nelineární model s kinematickým zpevněním, který vykazoval dobré výsledky pouze v případě výpočtu podpovrchového toku materiálu. Nebyl však vhodný pro výpočet povrchového toku materiálu. V případě výpočtů v povrchové oblasti je nutné rovněž uvažovat vliv normálového napětí σ_x (rovnoběžné s povrchem), Bower a Johnson ve svých výpočtech však uvažují pouze smykové napětí τ_{xz} , které je jako jediná komponenta odpovědná za tok materiálu v kontaktu.

V případě semi-analytických metod se můžeme setkat se zajímavým přístupem u A. Mazzua, jenž ve svém článku [9] představil zjednodušený model s kinematickým zpevněním,

vycházející z Chabocheova-Lemaitreova modelu plasticity, který bere v úvahu pouze složku smykového napětí τ_{xz} . Později uveřejňuje [10] korekci svého modelu, ve kterém je navíc zahrnut vliv složky normálového napětí σ_x , působícího v povrchové vrstvě materiálu, aniž by došlo ke zvýšení nároků na výpočetní časy.

S rostoucím rozvojem výpočetní techniky se v posledních letech objevily rovněž modely opotřebení, zohledňující interakci vlakové soupravy s kolejnicí a podložím [11], takto pojaté komplexní řešení s sebou stále přináší komplikace v narůstání výpočetního času. Řada autorů ve svých modelech opotřebení vychází z experimentálně stanovených funkcí opotřebení [12][13][14]. Franklin a Kapoor naproti tomu představili numerický 2D model [15], který využívá trojdimenzionální rozložení kontaktních napětí. Zároveň je zde možné modelovat mikrostrukturu dané oceli, včetně stádia iniciace únavových trhlin. Nespornou výhodou většiny těchto modelů je uvažování bodového kontaktu, který se v technické praxi vyskytuje v daleko větší míře než je tomu v případě kontaktu liniového.

3 Cíle disertační práce

S ohledem na uvedenou literární rešerši z předchozí kapitoly byly formulovány následující cíle disertační práce:

1. Provést experimentální výzkum v oblasti liniového kontaktu
 - 1.1. Představit laboratorní vybavení pro realizaci zkoušek kontaktní únavy a nového konceptu nového zkušebního stroje na autorově pracovišti
 - 1.2. Navrhnout modifikaci stávajícího zkušebního stroje pro konkrétní typy zkoušek
 - 1.3. Stanovit vliv drsnosti povrchu na evoluci opotřebení a výzkum iniciační fáze defektů pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T
 - 1.4. Stanovit vliv historie zatěžování na odolnost proti opotřebení pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T
 - 1.5. Stanovit vliv velikosti kontaktního tlaku na odolnost proti opotřebení pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T
 - 1.6. Realizovat a vyhodnotit zkoušku kontaktní únavy pro případ bodového kontaktu
2. Vyvinout metodiku pro predikci míry opotřebení na základě numerických výpočtů v oblasti liniového kontaktu
 - 2.1. Zmapovat současný trend modelů opotřebení v oblasti liniového a bodového kontaktu v posledních letech
 - 2.2. Vybrat a představit konkrétní algoritmus pro predikci ratchetingu v oblasti liniového kontaktu a naprogramovat prostřednictvím vhodného programovacího jazyka
 - 2.3. Navrhnout metodiku identifikace materiálových parametrů pro použitý algoritmus opotřebení
 - 2.4. Ověřit vytvořený algoritmus a metodiku identifikace materiálových parametrů na experimentu, vykonaném na autorově pracovišti
3. Vyhodnotit v práci dosažené výsledky studií
 - 3.1. Uvedení výsledků srovnání numerických simulací a experimentů
 - 3.2. Prezentace dvou aplikací zpracovaného algoritmu v oblasti kontaktní únavy
 - 3.3. Zhodnotit možnosti aplikace navržené metodiky v inženýrské praxi a formulovat možnosti dalšího výzkumu v předmětné problematice

4 Experimentální zázemí pro zkoušky v oblasti kontaktní únavy na autorově pracovišti

Pro realizaci zkoušek valivého kontaktu disponuje autorovo pracoviště zkušebním zařízením TUORS (Technical University of Ostrava – Rolling Sliding wear testing machine) (Obrázek 2), které bylo navrženo autory z Katedry pružnosti a pevnosti VŠB TU Ostrava v rámci spolupráce s firmou BONATRANS a.s. Pohon obou vzorků je zajištěn pomocí asynchronního motoru o výkonu 2,2 kW. Průměr vzorků z materiálu kola a kolejnice je možné s ohledem na omezení z hlediska konstrukčního uspořádání v určitém rozsahu měnit. V současné době se používá kladka (materiál kola) o vnitřním průměru 35 mm, přičemž vnější průměr kladky by neměl být větší než 85 mm. V případě realizace zkoušek s konstantním prokluzem je vnější průměr bubnu vázán rozměrem kladky a pohybuje se okolo 213 mm [16].



Obrázek 2: Zkušební zařízení vyvinuté pracovníky katedry pružnosti a pevnosti VŠB-TUO

Prokluz je realizován prostřednictvím rozdílných obvodových rychlostí obou vzorků díky použitému převodu, vloženému mezi výstupní hřídel pro vzorek z materiálu kolejnice a vstupní hřídel pro vzorek z materiálu kola. U tohoto stroje můžeme rovněž simulovat prosté odvalování obou vzorků prostřednictvím odstavení převodu mezi danými hřídeli. Radiální síla mezi tělesy v kontaktu je vyvozena pomocí závaží přes pákový převod a neměla by přesáhnout 9000 N v případě prostého odvalování těles v kontaktu, za podmínek nuceného prokluzu v kontaktu musí být síla přiměřeně menší [16].

Na zkušebním zařízení mohou být také realizovány zkoušky kontaktní únavy při sekvenčním brzdění, které nám umožňují do určité míry simulovat přechodový děj, jakým je v oblasti kolejové dopravy mimo jiné i brzdění vlakové soupravy. Zkušební přípravek se sestává z platformy, na které je uchycen ložiskový domek s elektromagnetickou brzdou fy Ortlinghaus, která je napájena stejnosměrným napětím o maximální velikosti 24 V, při kterém vyvine brzdňý moment o velikosti 120 N·m. Generovaný brzdňý moment je posléze přenáš

přes hřídel s dvěma pružnými spojkami na vzorek z materiálu kola. V rámci řešení projektu Studentské grantové soutěže VŠB-TUO č. SP2010/171 realizoval autor disertace zkoušky valivého kontaktu s přítomností maziva s využitím infuzního zařízení.

V roce 2011 byl v rámci projektu Studentské grantové soutěže VŠB-TUO č. SP2011/157 stroj modifikován pro výzkum kontaktní únavy při konstantní zátěži. Díky novému uspořádání stroje, které se v tomto případě sestává z dvojice pohonných jednotek, je možné nezávisle měnit otáčky obou vzorků. Tento fakt s sebou přináší rovněž možnost plynulého a zároveň pohodlného nastavení prokluzu, než je tomu v případě jednomotorového uspořádání s přítomností převodovky.

Zkušební přípravek se sestává z platformy, na které je uchycen ložiskový domek s řemenicí, sloužící k pohonu horního vzorku z materiálu kola. Samotný pohon je zajištěn šesti pólovým elektromotorem Siemens o výkonu 3 kW. Výkon se na hřídel se vzorkem z materiálu kola převádí prostřednictvím řemenového převodu. Frekvenční měnič, pomocí něhož je motor řízen, je možné propojit s PC a zaznamenávat řadu měřených veličin.

V rámci autorovy diplomové práce [20] byl zpracován koncepční návrh nového zkušebního stroje, umožňujícího provádět zkoušky pro různé průměry testovacích vzorků, které by bylo možné nezávisle na sobě měnit včetně různých hodnot prokluzů, měnitelných v určitém rozsahu. Zkušební stroj se vyznačuje zejména novým způsobem uchycení vzorků pomocí svěrného spojení s kuželovou stykovou plochou a generací prokluzu prostřednictvím dvou pohonných jednotek a dále také odlišnou realizací přitlačné síly prostřednictvím přímočarého hydromotoru. V případě zkoušek s prokluzem je u zkušebního zařízení možné vyvinout maximální kontaktní tlak o velikosti 1200 MPa ve středu kontaktní plochy. Tento údaj je vázán zejména na rozměry zkušebních vzorků, konkrétně na jejich průměr a šířku kontaktní plochy. Maximální otáčky pro zkoušky s prokluzem jsou stanoveny na hodnotu 1500 ot/min. V případě zkoušek s volným odvalováním je možné dosáhnout maximálního kontaktního tlaku o velikosti až 2000 MPa v případě vzorků o průměru 85 mm a šířce kontaktní plochy v axiálním směru o velikosti 5 mm.

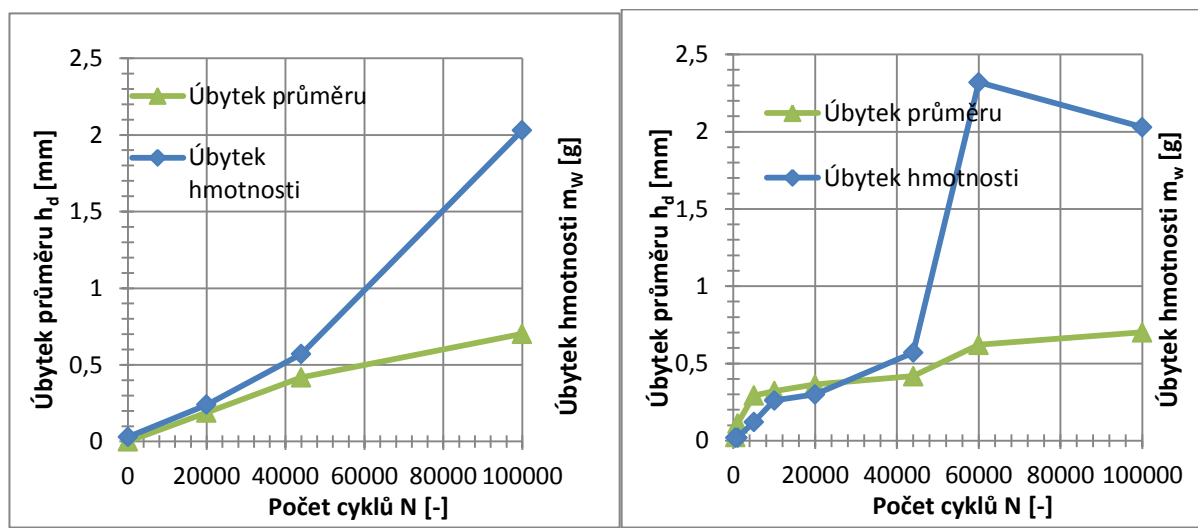
5 Prezence experimentálních výsledků na autorově pracovišti

Katedra pružnosti a pevnosti na Fakultě strojní VŠB – TU Ostrava disponuje poměrně rozsáhlou databází výsledků experimentálních zkoušek v oblasti kontaktní únavy jak liniového, tak i bodového kontaktu. V následující kapitole se autor věnuje prezentaci vybraných výsledků z oblasti liniového kontaktu. Prezentovaná experimentální data jsou výsledky experimentů, realizovaných v letech 2009 až 2011 v laboratoři kontaktní únavy Katedry pružnosti a pevnosti na experimentálním zařízení pro výzkum kontaktní únavy TUORS. Některé z nich byly publikovány v [17] nebo [18]. S ohledem na omezený rozsah autoreferátu zde autor disertace stručně uvádí dva nejpodstatnější výsledky z realizovaných experimentů.

5.1. Vliv drsnosti povrchu na evoluci opotřebení a výzkum iniciační fáze defektů pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T

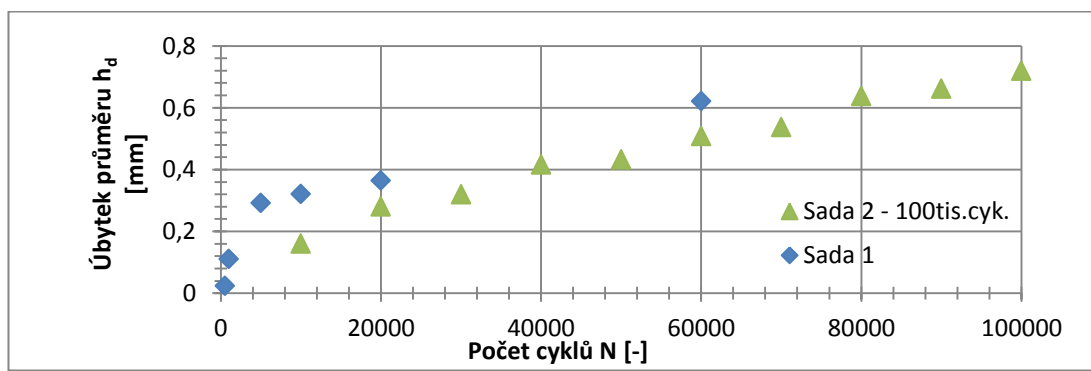
Zkoumán byl případ přímkového styku. Průměr zkušební kladky byl 82.45mm (ocel R7T), počáteční šířka obou vzorků byla 8 mm. Maximální Hertzův tlak, odpovídající přitlačné síle o

velikosti 9 kN mezi kladkou a bubnem, byl 1200 MPa. Otáčky zkušební kladky během každého testu byly nastaveny na hodnotu 280 ot./min⁻¹. Jednotlivé vzorky absolvovaly 500, 1000, 5000, 10000, 20000 a 60000 cyklů. Pro potvrzení hypotéz byly navíc realizovány čtyři doplňkové testy pro počty cyklů 100, 20000, 44000, 100000. Na následujícím grafu (Graf 1) jsou vyobrazeny průběhy úbytku hmotnosti a průměru pro vzorky s počáteční drsností stykové plochy 0,4 μm (vlevo), resp. 0,8 μm (vpravo).



Graf 1: Úbytek hmotnosti a změna průměru s počtem absolvovaných cyklů pro vzorek s počáteční drsností stykové plochy $R_a = 0,4\mu\text{m}$ (vlevo) a $R_a = 0,8\mu\text{m}$ (vpravo)

Z výsledků experimentů je zřejmé, že zhruba po 20000 cyklech dochází ke zvětšování míry opotřebení za cyklus, což pravděpodobně souvisí s odlupováním šupinek materiálu na kontaktní ploše. Zkouška s konečným počtem cyklů 100000 (vzorek ze sady 2 - $R_a = 0,4\mu\text{m}$) byla jako jediná přerušována, a to vždy po 10000 cyklech. Důvodem bylo testování metody digitální korelace obrazu pro měření deformací na čele vzorku. Použit byl přístroj Dantec Dynamics Q400. Při každém přerušení testu byl změřen aktuální průměr vzorku. Úbytek průměru vzorku během zkoušky je znázorněn spolu s výsledky sady vzorků s počáteční drsností kontaktní plochy $R_a = 0,8\mu\text{m}$ na grafu níže (Graf 2). Odtud je zřejmé, že trend časové změny průměru je shodný u obou sad vzorků. Hladší vzorky však vedou k nižšímu opotřebení v počátečních cyklech.



Graf 2: Závislost úbytku průměru na počtu cyklů u sady 1 a nejdelšího testu

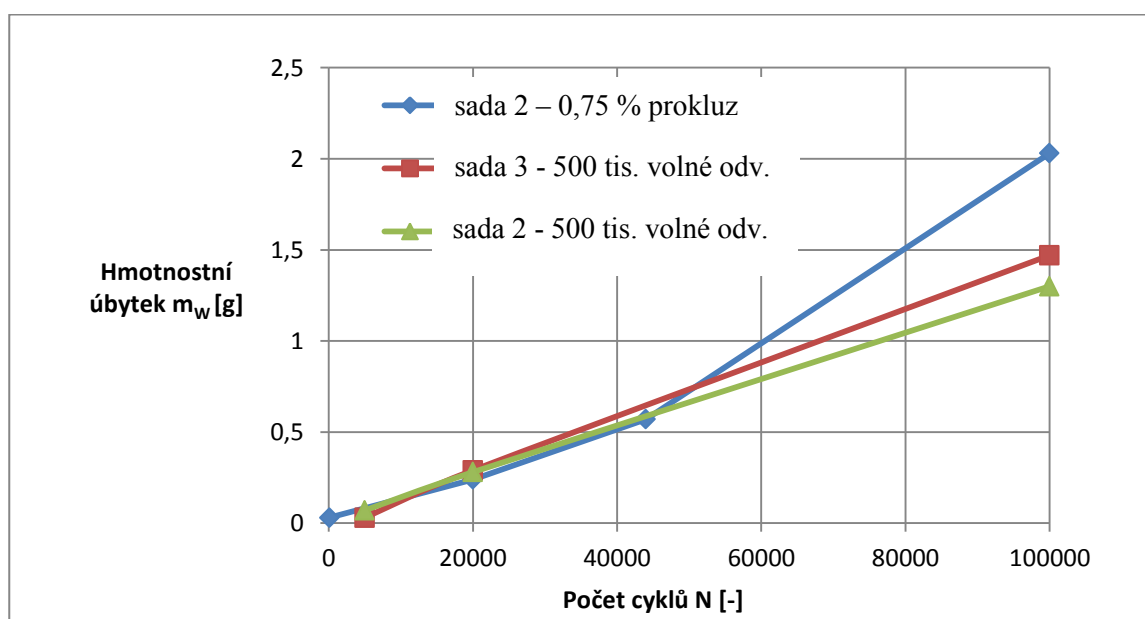
5.2. Vliv historie zatěžování na odolnost proti opotřebení pro případ liniového kontaktu u materiálu R7T

Pro účely stanovení vlivu historie zatěžování na odolnost proti opotřebení byl opětovně uvažován případ přímkového styku. Průměr zkušební kladky byl i v tomto případě roven 82.45mm (ocel R7T), počáteční šířka obou vzorků byla 8 mm. Zkoumán byl opětovně případ přímkového styku. Maximální Hertzův tlak, odpovídající přitlačné síle mezi kladkou a bubnem 9 kN, byl 1200 MPa. Otáčky zkušební kladky během každého testu byly nastaveny na hodnotu 280 ot./min⁻¹.

Experimentálně byla zkoumána odolnost proti opotřebení při valivém kontaktu při nuceném prokluzu 0,75% po předchozím volném odvalování (500tis. cyklů) pro tři sady vzorků z materiálu R7T (sada č. 1 – $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, sada č. 2 – $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, sada č. 3 – $R_a = 0,4 \mu\text{m}$). Aplikováno bylo statické zatížení vedoucí k vyvození Hertzova kontaktního tlaku 1200MPa, jako u předchozích testů. Realizovány byly případy:

- 1) 500tis. cyklů volné valení – 5000 cyklů s prokluzem 0,75%
- 2) 500tis. cyklů volné valení – 20000 cyklů s prokluzem 0,75%
- 3) 500tis. cyklů volné valení – 100000 cyklů s prokluzem 0,75%

Vybrané zkoušky byly realizovány dvakrát, a to na vzorcích s drsností povrchu 0,4 μm a 0,8 μm z důvodu nutnosti potvrzení hypotézy o vlivu drsnosti povrchu na závislost trakčního koeficientu na počtu cyklů a na opotřebení. Z níže uvedeného grafu (Graf 3) vyplývá malý vliv historie zatížení na parametry opotřebení kontaktního povrchu. Jinými slovy, zkoušky s prvotním zatížením 500tis. cykly bez prokluzu a následnou sekvencí cyklů s prokluzem vykazují shodný trend evoluce opotřebení s přibližně stejnými hodnotami opotřebení pro dané počty cyklů v porovnání se zkouškami, které nezahrnovaly prvotní zatížení formou volného odvalování.



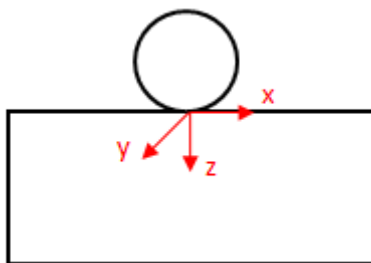
Graf 3: Srovnání hmotnostních úbytků pro případ nuceného prokluzu 0,75% a případ s předchozím volným valením

6 Predikce plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem pro případ liniového kontaktu s využitím Mazzuova přístupu

V následující kapitole bude představen Mazzuův model, který je v kooperaci s shear band cracking mechanismem autorem disertace využíván k predikci plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem pro případ uvažovaného přímkového styku. V druhé části této kapitoly se autor věnuje aplikaci Mazzuova algoritmu pro konkrétní případ a zátěžné podmínky.

6.1. Predikce plastické smykové deformace s využitím Mazzuova algoritmu

Model, uveřejněný A. Mazzu, je založen na předpokladu, kdy jedinou složkou napětí, která ovlivňuje tečení materiálu v kontaktní ploše je komponenta τ_{xz} . Tato hypotéza je platná v případě toku materiálu v podpovrchových vrstvách pod kontaktní plochou, kde převládá proces kinematického zpevnění v důsledku smykové deformace [9].



Obrázek 3: Souřadný systém

K určení přírůstku plastické deformace je využito Chaboche-Lemaitreova modelu plasticity, který je upraven pro případ podmínky čistého smyku. Podmínka plasticity má v tomto případě tvar, jak uvádí následující rovnice

$$F = \left| \sqrt{3} \cdot \tau_{xz} - X_{xz} \right| - (R + \sigma_L) \leq 0, \quad (6.1)$$

kde σ_L je počáteční napětí na mezi kluzu, X_{xz} vyjadřuje smykovou složku kinematického tenzoru napětí a R je izotropní proměnná. V případě, že přírůstek tenzoru napětí směřuje vně plochy plasticity, dojde k plastické deformaci na základě podmínky

$$F = \left| \sqrt{3} \cdot \tau_{xz} - X_{xz} \right| - (R + \sigma_L) = 0, \quad (6.2)$$

která vyvodí variaci jak izotropního tak kinematického členu. Tyto členy ovlivňují poloměr resp. polohu plochy plasticity. Variace kinematického tenzoru a izotropní proměnné jsou dány Armstrong-Frederickovým a Voceho pravidlem, tedy

$$dX_{xz} = C \cdot \frac{d\gamma_{xz}}{\sqrt{3}} - \gamma \cdot X_{xz} \left| \frac{d\gamma_{xz}}{\sqrt{3}} \right| \quad (6.3)$$

respektive

$$R = R_{\infty} \cdot \left[1 - e^{-b \cdot \frac{\gamma_{xz}}{\sqrt{3}}} \right], \quad (6.4)$$

kde C , γ , R_{∞} a b jsou materiálové konstanty. Uvedený tvar izotropní proměnné, která je dána výrazem (6.4) nepodávala na základě numerických výpočtů uspokojivé výsledky. Z tohoto důvodu se autor disertace rozhodl izotropní proměnnou rozšířit o další dodatečný člen s cílem regulovat izotropní zpevnění více flexibilněji, než tomu je v případě použití pouze jednoho členu. Vztah pro autorem použitou variantu izotropní proměnné je dán následujícím výrazem

$$R = R_{\infty 1} \cdot \left[1 - e^{-b_1 \cdot \frac{\gamma_{xz}}{\sqrt{3}}} \right] + R_{\infty 2} \cdot \left[1 - e^{-b_2 \cdot \frac{\gamma_{xz}}{\sqrt{3}}} \right], \quad (6.5)$$

což odpovídá superpozici dvou izotropních pravidel Voce.

Integrací rovnice (6.3) obdržíme vztah pro složku kinematického tenzoru X_{xz} , který je posléze dán rovnicí

$$X_{xz} = \nu \cdot \frac{C}{\gamma} + \left(X_{xz}^0 - \nu \cdot \frac{C}{\gamma} \right) \cdot e^{\left[\frac{\nu \cdot \gamma}{\sqrt{3}} (\gamma_{xz} - \gamma_{xz}^0) \right]}, \quad (6.6)$$

kde $\nu = 1$ pro zatěžování a $\nu = -1$ pro odlehčování, zatímco X_{xz}^0 a γ_{xz}^0 vyjadřují počáteční hodnoty pro kinematický tenzor respektive smykovou deformaci. Variace smykového napětí τ_{xz} je pro jednoduchost algoritmu aproximována na základě Boussinesquovy hypotézy i přes to, že se tento přístup pojí s elastickými problémy. Hodnoty smykového napětí pro jednotlivé vrstvy mohou být rovněž stanoveny s použitím MKP přístupu. Tento přístup byl realizován v programu Ansys, viz publikace autora [30]. Vztah mezi smykovým napětím, složkou kinematického tenzoru a izotropní proměnnou je dle podmínky plasticity dán následujícím výrazem

$$\tau_{xz} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [X_{xz} + \nu \cdot (R + \sigma_L)] \quad (6.7)$$

Pro vzájemnou relaci mezi složkou kinematického tenzoru a smykovým napětím pro dva zátěžné stavy musí platit

$$X_{xz} - X_{xz}^0 = \sqrt{3} \cdot (\tau_{xz} - \tau_{xz}^0) \quad (6.8)$$

Ze vztahu (6.7) je možné odvodit vztah pro přírůstek plastické smykové deformace $\Delta\gamma_{xz}$

$$\Delta\gamma_{xz} = -\frac{\sqrt{3}}{\nu \cdot \gamma} \cdot \ln \left(\frac{X_{xz} - \nu \cdot \frac{C}{\gamma}}{X_{xz}^0 - \nu \cdot \frac{C}{\gamma}} \right) \quad (6.9)$$

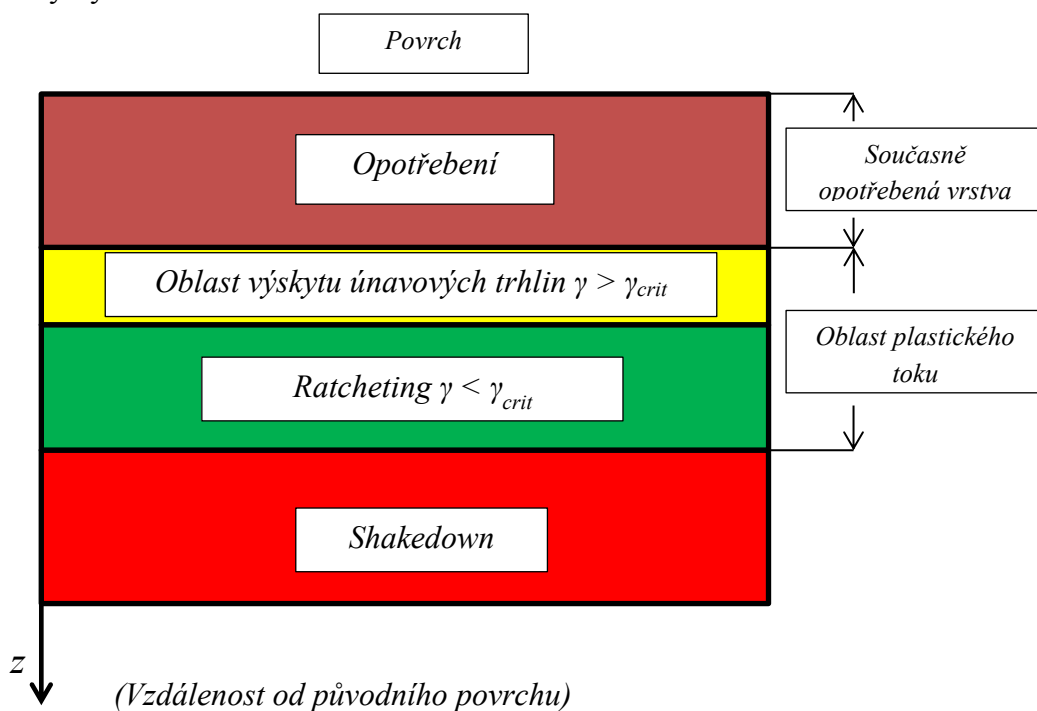
Uvedený algoritmus je díky použitému Chaboche-Lemaitrovu modelu cyklické plasticity schopný zachytit všechna čtyři základní chování materiálu. A. Mazzu posléze navrhl korekci

algoritmu [10], která zohledňuje vliv normálového napětí σ_x na akumulaci plastické smykové deformace v hloubkách bezprostředně pod funkčním povrchem. Korekce algoritmu je založena na aplikaci dvou modifikačních funkcí, které vhodně upravují velikost plochy plasticity a dále také poměr C/γ ve vztahu pro výpočet přírůstku plastické smykové deformace $\Delta\gamma_{xz}$.

7 Shear band cracking mechanismus

Algoritmus, navržený pro účely predikce opotřebení v případě liniového kontaktu využívá vedle Mazzuova přístupu evoluce plastické smykové deformace navíc i tak zvaný shear band cracking mechanismus, který je jeho hlavním stavebním prvkem.

Řada experimentů [1][2] ukázala, že povrchové trhliny směrově následují orientaci plastického toku, vzniklého vlivem vyčerpání plastických schopností materiálu. Tuto skutečnost popisuje již zmíněný shear band cracking mechanismus. Zatímco dochází k odlupování povrchových vrstev materiálu, plastická smyková deformace v podpovrchových vrstvách materiálu dosahuje také postupně kritické hodnoty γ_{crit} , což opět vede k odloupení další vrstvy. Tento koloběh vytváří ideální podmínky pro stabilizovaný růst trhliny díky kontinuální ztrátě plastických schopností materiálu směrem do hloubky. Čelo trhliny se následně posouvá směrem do středu vzorku rychlostí, která je shodná s rychlostí opotřebení kontaktní plochy ve směru osy z . Ratcheting je tedy hlavním činitelem, odpovědným za iniciaci a následnou propagaci povrchových trhlin vedoucí k finálnímu odlupování materiálu z kontaktního povrchu. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma procesu opotřebení kontaktního povrchu v případě uvažovaného shear band cracking mechanismu. Podle [1] v materiálu existují celkem čtyři vrstvy: vrstva opotřebení, vrstva s oblastí výskytu únavových trhlin, vrstva ratchetingu a vrstva ve které došlo k přizpůsobení. Tento celý profil se posléze posouvá směrem do hloubky s přibývajícími cykly.



Obrázek 4: Schéma procesu opotřebení kontaktního povrchu

8 Identifikace materiálových parametrů

Postup identifikace materiálových parametrů dle Donzelly a kol. [1] je jak finančně, tak i časově náročná záležitost. Z tohoto důvodu byl autorem disertace využit inverzní algoritmus, který byl původně vytvořen Ing. Jaroslavem Rojíčkem, Ph.D. v jeho disertační práci [19]. Vzhledem k charakteru úlohy nebylo v inverzním algoritmu možné použít gradientních metod. Algoritmus v sobě zahrnuje generátor náhodných čísel, který pro každý cyklus vytváří na základě počátečních hodnot a nastavení sadu materiálových parametrů, posléze vstupujících do výpočtu opotřebení a predikce ratchetingu pod kontaktním povrchem. V závěrečném kroku daného cyklu je proveden výpočet chyby a opětovně začíná nový cyklus. Výraz pro výpočet chyby je následujícího tvaru

$$error^i = \frac{1}{3} \cdot \sum_{k=1}^4 \left(2 \cdot \frac{|N_{ref\ k} - N^k|}{N_{ref\ k}} + \frac{|h_{Wref\ k} - h_W^k|}{h_{Wref\ k}} \right), \quad (8.1)$$

kde $N_{ref\ k}$ vyjadřuje referenční počet cyklů, N^k algoritmem vypočtený počet cyklů potřebný k dosažení úbytku poloměru h_W^k a $h_{Wref\ k}$ vyjadřuje referenční úbytek poloměru, odpovídající referenčnímu počtu cyklů. Nutno poznamenat, že prostřednictvím váhy o velikosti 2 je kladen větší důraz na algoritmem vypočtený počet cyklů N^k k dosažení úbytku poloměru h_W^k . V případě, že je chyba pro daný krok nižší než poslední uložená referenční hodnota chyby, dojde k uložení materiálových parametrů z daného kroku a velikost chyby v daném cyklu bude sloužit jako nová referenční hodnota.

Nyní se zaměříme na identifikaci materiálových parametrů Armstrong-Frederickova modelu pro konkrétní experiment, který byl realizován na autorově pracovišti. Na základě ověření lineární závislosti mezi opotřebením a počtem realizovaných cyklů je tedy plně postačující stanovit hmotnostní úbytek pouze na konci daného experimentu, ze kterého posléze vypočteme úbytek poloměru odpovídající koncovému počtu simulovaných cyklů. K dispozici budeme mít v souřadném systému, kdy svislá osa reprezentuje úbytek poloměru h_W a vodorovná osa reprezentuje počet realizovaných cyklů N dva body:

- 1 bod: $[0,0]$
- 2 bod: $[\text{koncový počet cyklů}, \text{úbytek poloměru odpovídající koncovému počtu cyklů}]$

Uvedenými body proložíme lineární funkci, pomocí níž bude možné určit hodnotu opotřebení průměru pro libovolný počet cyklů. Pro identifikaci materiálových parametrů byly ve většině případů definovány čtyři referenční počty cyklů s odpovídající si hodnotou hloubky vrstvy (vypočtené na základě získané lineární regrese z výše uvedených dvou bodů), která by měla být vlivem opotřebení odstraněna. Následující tabulka obsahuje výstupy konkrétního experimentu, které byly použity k naladění materiálových parametrů Armstrong-Frederickova modelu.

Tabulka 1: Experimentální a vypočtená data

Typ materiálu:	R7T
Počet simulovaných cyklů N :	100000 [-]
Maximální kontaktní tlak p_0 :	1200 [MPa]
Velikost poloosy a :	0,728 [mm]
Trakční koeficient f :	0,25 [-]
Hmotnostní úbytek m_{CW} :	2,03 [g]
Počáteční šířka vzorku s_{poc} :	8 [mm]
Koncová šířka vzorku s_{kon} :	9,84[mm]
Koncový průměr vzorku d_{kon} :	81,737 [mm]
Hustota materiálu vzorku ρ :	7850 [kg·m ⁻³]
Počáteční drsnost stykové plochy vzorku R_a :	0,8 [μm]

Na rozdíl od zkoušek s konstantní zátěží se u zkoušky s konstantním prokluzem potýkáme s proměnným trakčním koeficientem, jehož velikost závisí na počtu realizovaných cyklů [17]. Průběh trakčního koeficientu je mimo jiné závislý na velikosti maximálního kontaktního tlaku, materiálu kola a kolejnice, atmosférických podmínkách, typu kontaktu (mazaný/nemazaný), počáteční drsnosti stykových ploch. Shear band cracking mechanismus, zpracovaný autorem disertace pracuje pouze s konstantní hodnotou trakčního koeficientu, kterou je nutné na tomto místě stanovit. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici jak průběhy trakčního koeficientu, tak i hodnoty hmotnostních úbytků pouze do realizovaných 100 tis. cyklů [29], je nutné potřebná data extrapolovat. V případě požadovaných hodnot opotřebení poloměru pro počet cyklů větší než 100 000 využijeme lineární extrapolaci. Určitým problémem však bude, pokud možno co nejpřesněji, odhadnout hodnotu trakčního koeficientu, který bude v celém výpočtu figurovat jako konstanta. Pro účely identifikace materiálových parametrů u následujícího případu byla zvolena hodnota 0,25. Při pozdějších simulacích nás bude zajímat tvar a charakter deformačního profilu v rozmezí cyklů 300000 až 1300000, ve kterém by měly být voleny všechny čtyři referenční hodnoty cyklů s odpovídající vypočtenou hodnotou opotřebení dle rovnice lineární regrese

$$h_w = 1,13 \cdot 10^{-6} N + 0,01 \cdot 10^{-15}, \quad (8.2)$$

kde N je počet cyklů a h_w opotřebení poloměru v milimetrech. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty zvolených referenčních počtů cyklů s odpovídající hodnotou opotřebení poloměru, stanovenou z rovnice (8.2).

Tabulka 2: Vstupní data

Počet cyklů N_{ref} [-]	Opotřebení poloměru h_{wref} [mm]
290000	0,32
450000	0,5
600000	0,67
900000	1,01

Tabulka 3 poté obsahuje počáteční a optimalizované materiálové parametry Chabocheova modelu s využitím inverzního algoritmu.

Tabulka 3: Počáteční a optimalizované materiálové parametry Chabocheova modelu

Počáteční parametry		Optimalizované parametry	
Materiálový parametr	Hodnota	Materiálový parametr	Hodnota
C [MPa]	56000	C [MPa]	68339
γ [-]	3,3	γ [-]	2,972
σ_L [MPa]	400	σ_L [MPa]	415
$R_{\infty 1}$ [MPa]	85	$R_{\infty 1}$ [MPa]	103
b_1 [-]	0,002	b_1 [-]	0,00147
$R_{\infty 2}$ [MPa]	30	$R_{\infty 2}$ [MPa]	20
b_2 [-]	0,0003	b_2 [-]	0,0005

V následující tabulce jsou pro přehlednost uvedeny dosažené hodnoty úbytku poloměru pro referenční počty cyklů.

Tabulka 4: Dosažené hodnoty úbytku poloměru pro referenční počty cyklů

$h_{wref 1}$ [mm]	0,32	h_w^1 [mm]	0,32	$N_{ref 1}$ [-]	290000	N^1 [-]	263900
$h_{wref 2}$ [mm]	0,5	h_w^2 [mm]	0,5	$N_{ref 2}$ [-]	450000	N^2 [-]	444965
$h_{wref 3}$ [mm]	0,67	h_w^3 [mm]	0,67	$N_{ref 3}$ [-]	600000	N^3 [-]	588763
$h_{wref 4}$ [mm]	1	h_w^4 [mm]	1	$N_{ref 4}$ [-]	900000	N^4 [-]	782663
<i>error</i> [-]				0,16686			

9 Predikce opotřebení s využitím Mazzuova algoritmu

V předcházející kapitole jsme se zabývali nalezením, respektive identifikací, materiálových parametrů Chabocheova modelu plasticity tak, aby bylo možné co nejpřesněji simulovat proces opotřebení pro daný materiál a konkrétní podmínky. Jak již bylo zmíněno dříve, námi provedené numerické simulace budou v rozmezí 300000 až 1300000 cyklů, bude se jedna konkrétně o následující počty cyklů:

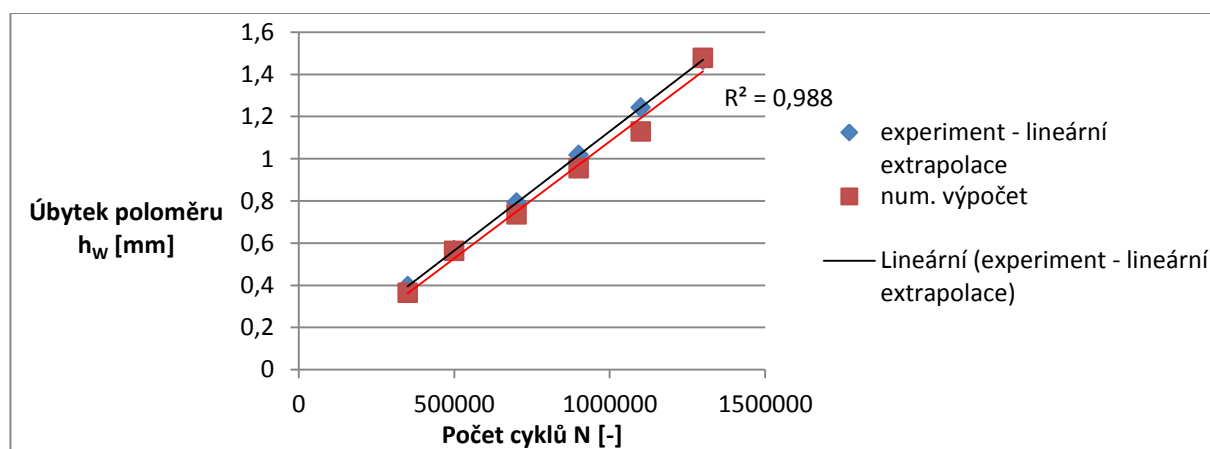
- 350000 cyklů
- 500000 cyklů
- 700000 cyklů
- 1100000 cyklů
- 1300000 cyklů

Ve všech případech bude stanovována míra úbytku poloměru a také charakter deformačního profilu pod kontaktním povrchem. Tabulka 5 nám rekapituluje zadané parametry, které figuruji u Mazzuova/shear band cracking algoritmu jako vstupní parametry.

Tabulka 5: Materiálové parametry Chab. modelu pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 1200$ MPa

		Hodnota
Materiálové parametry pro Chab. model	C [MPa]	68339
	γ [-]	2,972
	σ_L [MPa]	415
	$R_{\infty 1}$ [MPa]	103
	b_1 [-]	0,00147
	$R_{\infty 2}$ [MPa]	20
	b_2 [-]	0,0005
Parametry pro liniový kontakt	Maximální kontaktní tlak p_0 [MPa]	1 200
	Průměrná hodnota trakčního koeficientu f [-]	0,25
	Velikost kontaktní poloosy a [mm]	0,728
Ostatní parametry	Rozsah vyšetřovaných hloubek $y_{max} - y_{min}$ [mm]	0,3-2
	Počet hladin <i>pocet_hladin</i> [-]	40
	Hodnota kritické smykové deformace γ_{crit} [-]	9,1

Na následujících řádcích jsou shrnuty výsledky, dosažené s využitím Mazzuova algoritmu pro zadané vstupní parametry. Graf 4 obsahuje úbytky poloměru v závislosti na počtu simulovaných cyklů. Můžeme pozorovat velice dobrou shodu úbytku poloměru, vypočteného prostřednictvím Mazzuova algoritmu, s extrapolovanými experimentálními daty. Vypočtené úbytky poloměru rovněž vykazují lineární trend, který je podpořen vysokou hodnotou koeficientu determinance R^2 ve výši 0,988. V tabulce (Tabulka 6) níže jsou pro přehlednost uvedeny číselné výsledky z obou přístupů včetně chyby, která je vztažena k příslušné experimentální hodnotě.

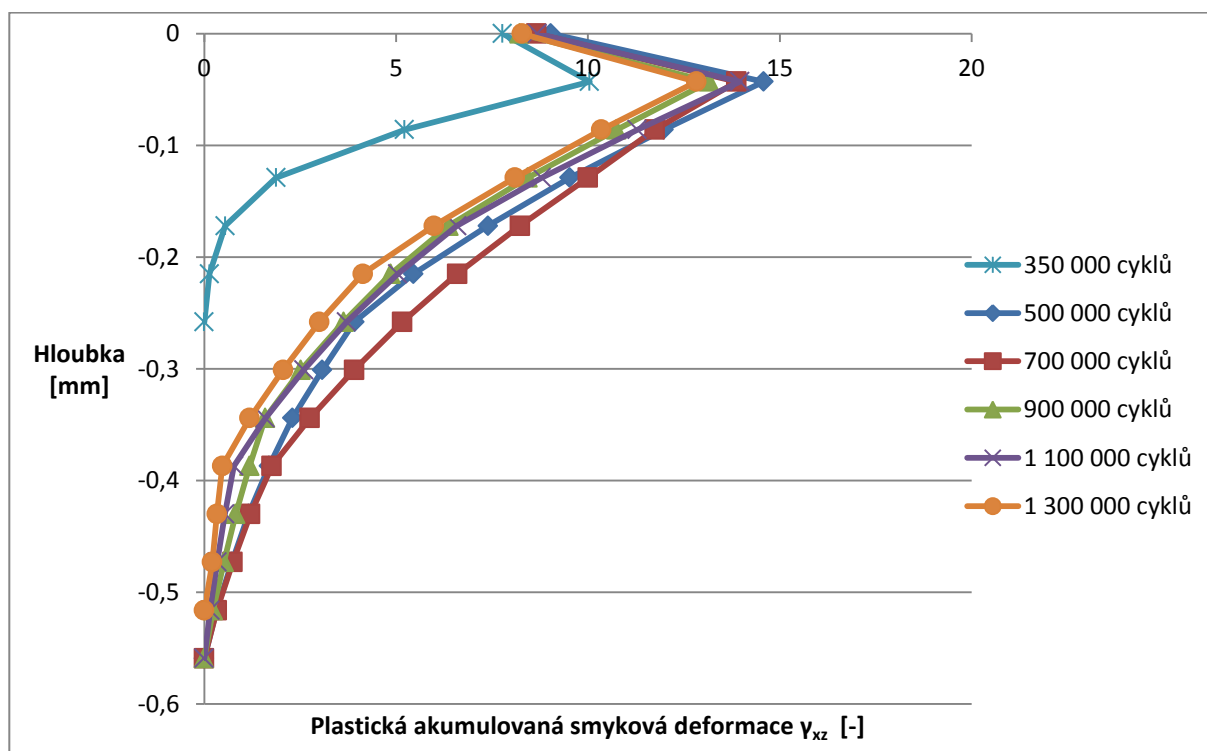


Graf 4: Úbytek poloměru v závislosti na počtu cyklů pro experiment a numerický výpočet

Tabulka 6: Úbytek poloměru v závislosti na počtu cyklů pro experiment a numerický výpočet

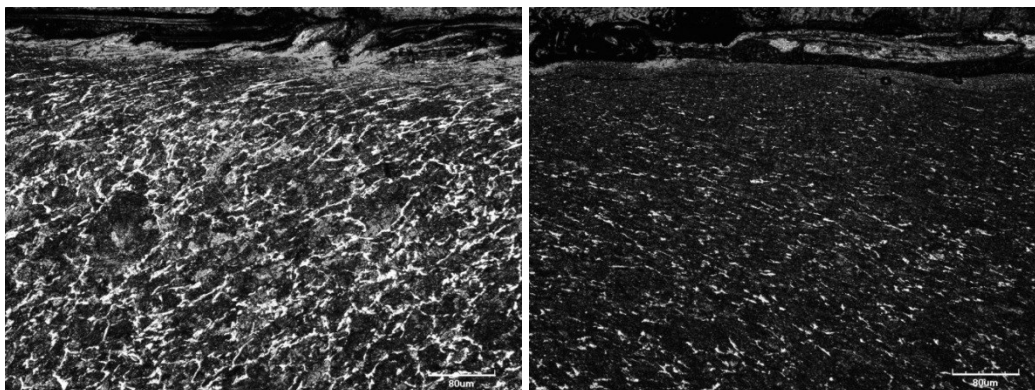
Počet cyklů N [-]	Úbytek poloměru h_w [mm]		Relativní chyba [%]
	extrapolovaná exp. data	num. výpočet	
350000	0,395	0,364	7,96
500000	0,565	0,562	0,53
700000	0,791	0,736	6,95
900000	1,017	0,954	6,19
1100000	1,243	1,128	9,25
1300000	1,469	1,477	0,54

Graf 5 zobrazuje vypočtené deformační profily pro zadané počty cyklů. Na rozdíl od [1] dochází ke stabilizaci profilu již dříve než po 500000 cyklech a to vzhledem k velikosti realizovaného prokluzu o velikosti 0,75 %. Po stabilizaci deformačního profilu navíc dochází se vzrůstajícím počtem cyklů k poklesu maximální hodnoty akumulované plastické smykové deformace v těsné blízkosti pod kontaktním povrchem. Uvedené chování má svůj původ v historii akumulace plastické smykové deformace v hladinách, které se nacházely v počátcích výpočtu ve vyšší hloubce, a s nárůstem simulovaných cyklů docházelo k jejich posuvu směrem ke kontaktnímu povrchu. Určitý vliv mají také korekční funkce, jejichž vliv směrem do hloubky klesá.



Graf 5: deformační profil pro zadané počty cyklů

Pro ukázkou autor disertace uvádí charakter struktury materiálu R7T, po 5000 (vlevo) a 60000 cyklech (vpravo) při prokluzu 0,75 % a maximálním kontaktním tlaku $p_0 = 1200$ MPa. Na fotografii struktury po absolvovaných 60000 cyklech je možné rozeznat tvar a charakter deformačního profilu pod kontaktním povrchem.



Obrázek 5: Struktura materiálu R7T po 5 000 (vlevo) a 60 000 cyklech (vpravo) při prokluzu 0,75 % a maximálním kontaktním tlaku $p_0 = 1200$ MPa

10 Aplikace Mazzuova algoritmu

Následující kapitola je věnována dvěma aplikacím Mazzuova algoritmu. V první aplikaci se autor zabývá studií použitelnosti Mazzuova algoritmu pro různé případy liniového kontaktu, konkrétně pro experimenty s maximálním kontaktním tlakem 800, 1000 a 1200 MPa. Zkoumán je vliv kontaktního tlaku na velikost hodnoty meze kluzu.

Druhá aplikace je věnována vlivu zbytkových napětí na akumulaci plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem. Na základě získaných napěťových polí z MKP modelu se zahrnutými, experimentálně zjištěnými, zbytkovými napětími a MKP modelu bez vnesených zbytkových napětí je proveden výpočet deformačního profilu pod kontaktním povrchem pro zadaný počet cyklů.

10.1. Studie použitelnosti Mazzuova algoritmu pro různé případy liniového kontaktu

Dostupná škála experimentálních dat pro materiál R7T na autorově pracovišti umožnila provést validaci Mazzuova algoritmu pro různé hodnoty maximálního kontaktního tlaku a díky tomu stanovit závislost meze kluzu na velikosti maximálního kontaktního tlaku p_0 . K dispozici byly výsledky hmotnostních úbytků po absolvování 100000 cyklů pro maximální kontaktní tlak p_0 o velikosti 800, 1000 a 1200 MPa, prokluzu o velikosti 0,75% a průměrných hodnotách trakčního koeficientu o velikostech $f_{p0=800} = 0,24$, $f_{p0=1000} = 0,35$ a $f_{p0=1200} = 0,32$ stanovených na základě [29]. V prvním kroku byl algoritmus naladěn pro případ maximálního kontaktního tlaku p_0 o velikosti 800 MPa. Výsledky identifikace materiálových parametrů můžeme shlédnout v následující tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7: Materiálové parametry Chab. modelu včetně počátečních a optimalizovaných materiálových parametrů s využitím inverzního algoritmu pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 800$ MPa

Materiálové parametry pro Chab. model		Počáteční stav	Optimalizovaný stav
	C [MPa]	150000	174636
	γ [-]	8	5,54
	σ_L [MPa]	150	172
	$R_{\infty 1}$ [MPa]	60	98
	b_1 [-]	0,03	0,0129
	$R_{\infty 2}$ [MPa]	30	47
	b_2 [-]	0,01	0,0035
Parametry pro liniový kontakt	Maximální kontaktní tlak p_0 [MPa]		800
	Průměrná hodnota trakčního koeficientu f [-]		0,24
	Velikost kontaktní poloosy a [mm]		0,482
Ostatní parametry	Hodnota kritické smykové deformace γ_{crit} [-]		9,1

Tabulka 8: Výstupní data inverzního algoritmu pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 800$ MPa

$h_{wref 1}$ [mm]	0, 2	h_w^1 [mm]	0,2	$N_{ref 1}$ [-]	250000	N^1 [-]	236477
$h_{wref 2}$ [mm]	0,36	h_w^2 [mm]	0,36	$N_{ref 2}$ [-]	450000	N^2 [-]	387633
$h_{wref 3}$ [mm]	0,48	h_w^3 [mm]	0,48	$N_{ref 3}$ [-]	600000	N^3 [-]	529633
error [-]				0,2066			

Pro následující dva identifikační procesy pro případ maximálního kontaktního tlaku o velikosti 1000 a 1200 MPa byly všechny parametry Chabocheova modelu kromě meze kluzu σ_L fixovány a provedla se identifikace pouze pro případ meze kluzu. Následující tabulky (Tabulka 9 až Tabulka 12) sumarizují dosažené výsledky.

Tabulka 9: Materiálový parametr σ_L pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 1000$ MPa

σ_L [MPa]	Počáteční stav	Optimalizovaný stav
	180	218
Parametry pro liniový kontakt	Maximální kontaktní tlak p_0 [MPa]	1000
	Průměrná hodnota trakčního koeficientu f [-]	0,29
	Velikost kontaktní poloosy a [mm]	0,603
Ostatní parametry	Hodnota kritické smykové deformace γ_{crit} [-]	9,1

Tabulka 10: Výstupní data inverzního algoritmu pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 1000 \text{ MPa}$

$h_{wref\ 1} [\text{mm}]$	0,25	$h_w^1 [\text{mm}]$	0,25	$N_{ref\ 1} [-]$	235000	$N^1 [-]$	223214
$h_{wref\ 2} [\text{mm}]$	0,45	$h_w^2 [\text{mm}]$	0,45	$N_{ref\ 2} [-]$	420000	$N^2 [-]$	385344
$h_{wref\ 3} [\text{mm}]$	0,6	$h_w^3 [\text{mm}]$	0,6	$N_{ref\ 3} [-]$	560000	$N^3 [-]$	506897
<i>error</i> [-]				0,1516			

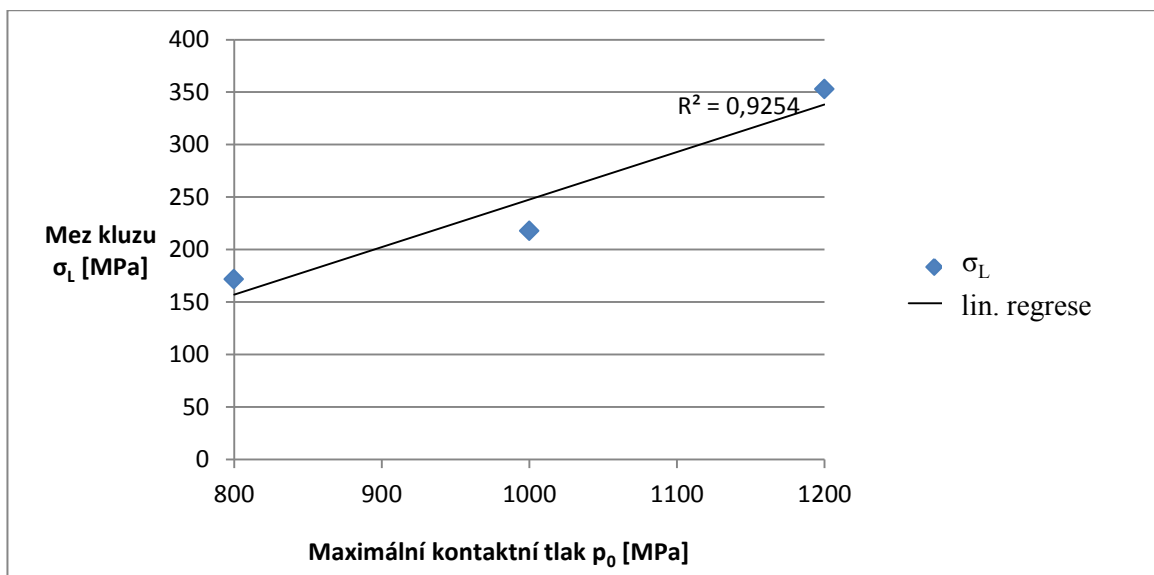
Tabulka 11: Materiálový parametr σ_L pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 1200 \text{ MPa}$

$\sigma_L [\text{MPa}]$	Počáteční stav	Optimalizovaný stav
	305	353
Parametry pro liniový kontakt	Maximální kontaktní tlak $p_0 [\text{MPa}]$	1200
	Průměrná hodnota trakčního koeficientu $f [-]$	0,33
	Velikost kontaktní poloosy $a [\text{mm}]$	0,728
Ostatní parametry	Hodnota kritické smykové deformace $\gamma_{crit} [-]$	9,1

Tabulka 12: Výstupní data inverzního algoritmu pro případ výpočtu s max. tlakem $p_0 = 1200 \text{ MPa}$

$h_{wref\ 1} [\text{mm}]$	0,25	$h_w^1 [\text{mm}]$	0,25	$N_{ref\ 1} [-]$	225000	$N^1 [-]$	170681
$h_{wref\ 2} [\text{mm}]$	0,45	$h_w^2 [\text{mm}]$	0,45	$N_{ref\ 2} [-]$	400000	$N^2 [-]$	303078
$h_{wref\ 3} [\text{mm}]$	0,61	$h_w^3 [\text{mm}]$	0,61	$N_{ref\ 3} [-]$	540000	$N^3 [-]$	409696
<i>error</i> [-]				0,4833			

Graf 6 shrnuje dosažené hodnoty meze kluzu v závislosti na hodnotě maximálního kontaktního tlaku p_0 . Při výpočtech byly využity pouze tři referenční hladiny a to z důvodu dosažení lepších výsledků než tomu bylo v případě požití čtyř a více hladin. Naladění modelu pro případ maximálního kontaktního tlaku $p_0 = 800 \text{ MPa}$ probíhalo i pro vyšší počet hladin bez problémů. Použili-li jsme ale danou konfiguraci hladin i pro ostatní hodnoty maximálních kontaktních tlaků vykazovaly výpočty relativně vysokou chybu a model nebyl prakticky laditelný. Důvodem je bezesporu malá flexibilita, která je zapříčiněna možností variace pouze jediného parametru při optimalizaci. I přes uvedený handicap můžeme považovat výsledek této numerické studie za uspokojující a je možné očekávat lineární korelaci mezi mezí kluzu a maximálním kontaktním tlakem.



Graf 6: Mez kluzu v závislosti na hodnotě maximálního kontaktního tlaku p_0

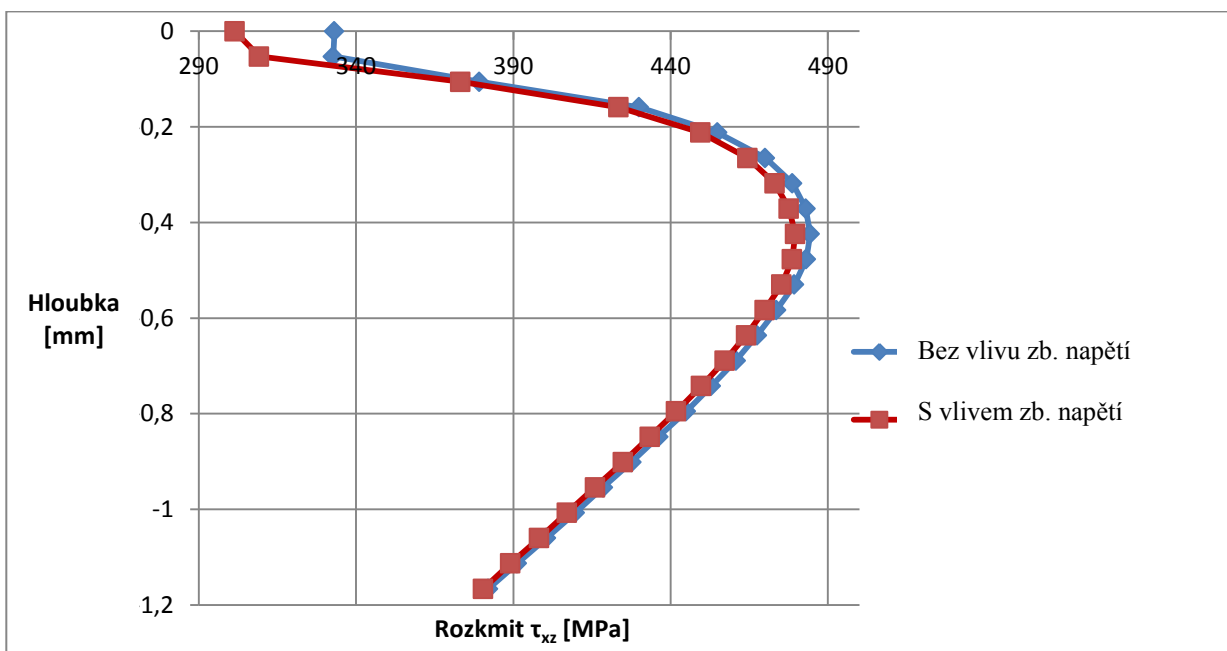
10.2. Vliv zbytkových napětí na akumulaci plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem

Zbytková, a to zejména tlaková napětí jsou v oblasti kontaktní únavy činitelem, který pozitivně ovlivňuje životnost dané strojní součásti. Z provedené numerické studie [24] vyplývá prospěšnost tlakových zbytkových napětí u železničních kol z pohledu opotřebení, které je způsobeno ratchetingem. Pro stanovení napěťového pole pod kontaktním povrchem sloužil MKP model s modelem cyklické plasticity AbdelKarim-Ohno, implementovaným do programu Ansys pomocí uživatelské subrutiny. Síť konečných prvků, včetně způsobu aplikace okrajových podmínek a jejich velikosti odpovídala numerické studii [17] a rovněž byla použita v [18]. Zbytková napětí, jejichž průběh byl určen na základě odvrťovací metody, se jako okrajová podmínka aplikovala prostřednictvím autorem disertace navrženého makra v jazyce APDL. Cílem bylo stanovit velikost úbytku poloměru pro případ s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí pro materiál R7T, který byl vystaven maximálnímu kontaktnímu tlaku o velikosti $p_0 = 1200$ MPa, průměrnou hodnotou trakčního koeficientu $f = 0,3$ a prokluzu o velikosti 0,75 %.

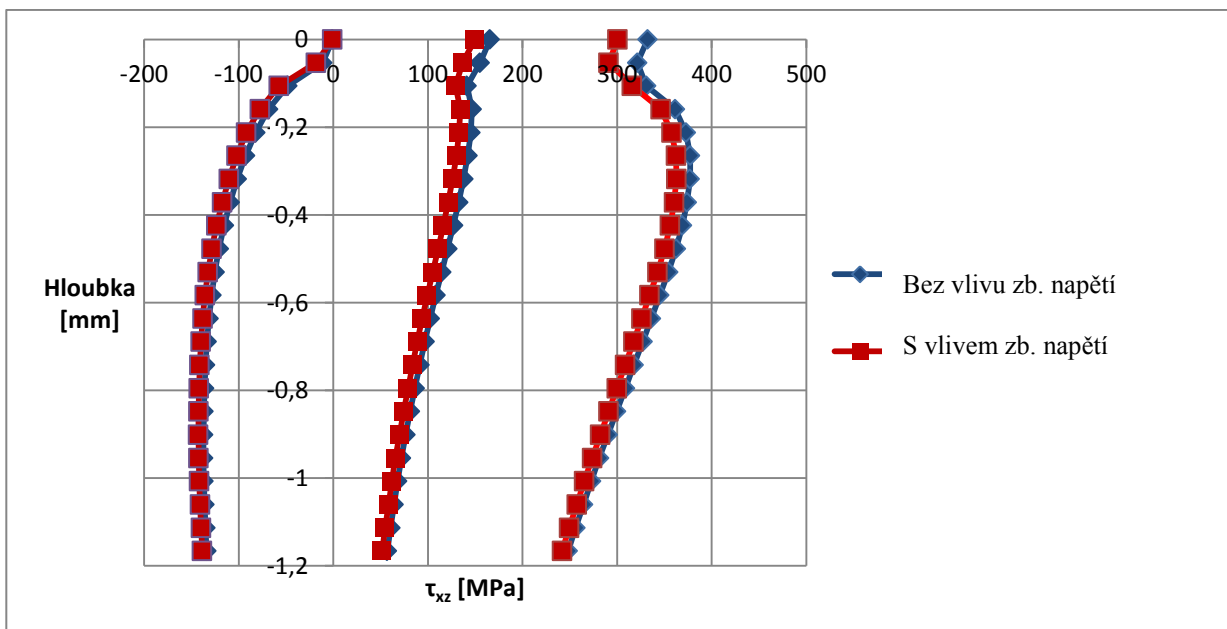
V prvním kroku bylo nutné získat napěťová pole pod kontaktním povrchem pro případ výpočtu bez uvažování a s uvažováním zbytkových napětí. Průběhy zbytkových napětí pro nezatížený vzorek v axiálním a radiálním směru [21] byly do MKP modelu zahrnuty s využitím autorem disertace navrženého makra, které bylo napsáno prostřednictvím jazyka APDL. Posléze bylo pro oba dva MKP modely (model bez vnesených zbytkových napětí a model s vnesenými zbytkovými napětími) simulováno necelých 1000 cyklů odvalování, přičemž v každém cyklu se průběžně ukládaly jednotlivé složky tenzoru napjatosti na vybraných uzlech pod kontaktním povrchem. V obou případech došlo ke stabilizaci průběhu smykového napětí, a to především maximální a minimální hodnoty, po absolvování řádově několika stovek cyklů. Průběh jednotlivých napěťových složek pro konkrétní hladiny za jeden cyklus byl proto použit z cyklu číslo 700.

Na následujících třech grafech jsou uvedeny průběhy smykového napětí τ_{xz} (Graf 7, Graf 8) a normálového napětí σ_x (Graf 9) s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí. V případě průběhu τ_{xz} ,

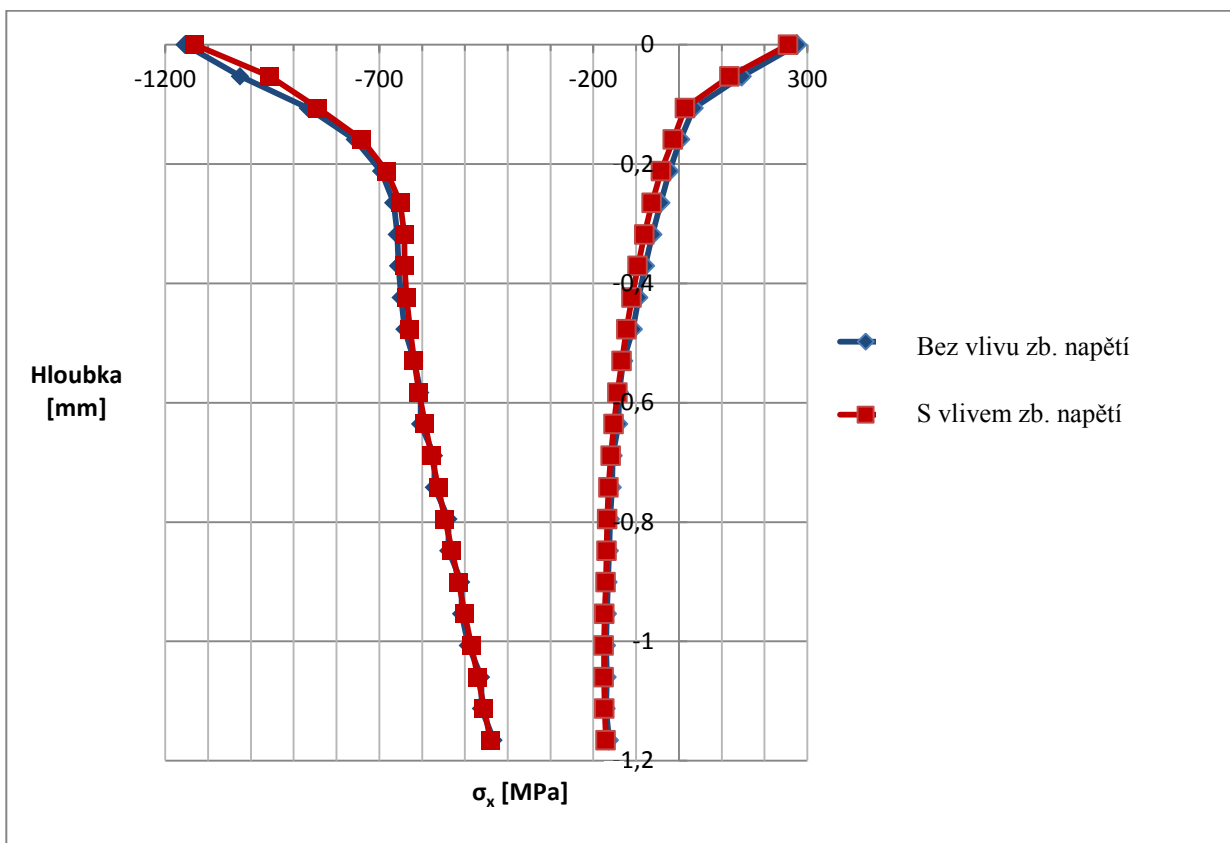
jakožto hlavní komponenty ovlivňující ratcheting v podpovrchové vrstvě, si můžeme všimnout jednak nižší hodnoty amplitudy, ale také nižší střední hodnoty ve všech hladinách v případě výpočtu s uvažováním zbytkových napětí. Určité, byť minimální rozdíly, bychom mohli nalézt rovněž v případě průběhu komponenty σ_x . Její vliv na evoluci ratchetingu, a to především v malých podpovrchových vrstvách, je prokazatelně nižší díky zahrnutí do korekční funkce algoritmu.



Graf 7: Rozkmit smykového napětí τ_{xz} s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí v závislosti na hloubce po absolvování 700 cyklů



Graf 8: Průběh maximálního, minimálního a středního napětí τ_{xz} s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí v závislosti na hloubce po absolvování 700 cyklů



Graf 9: Průběh maximálního a minimálního napětí σ_x s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí po absolvování 700 cyklů

V následujícím kroku bylo potřebné implementovat napěťová pole z vybraného cyklu do Mazzuova algoritmu a pro variantu s vlivem zbytkových napětí provést naladění materiálových konstant Chabocheova modelu plasticity pro shodné zátěžné podmínky s tím rozdílem, že využíváme nikoliv elastické, ale plastické napěťové pole. V následující tabulce jsou uvedeny materiálové parametry Chabocheova modelu, které byly obdrženy na základě využití inverzního algoritmu.

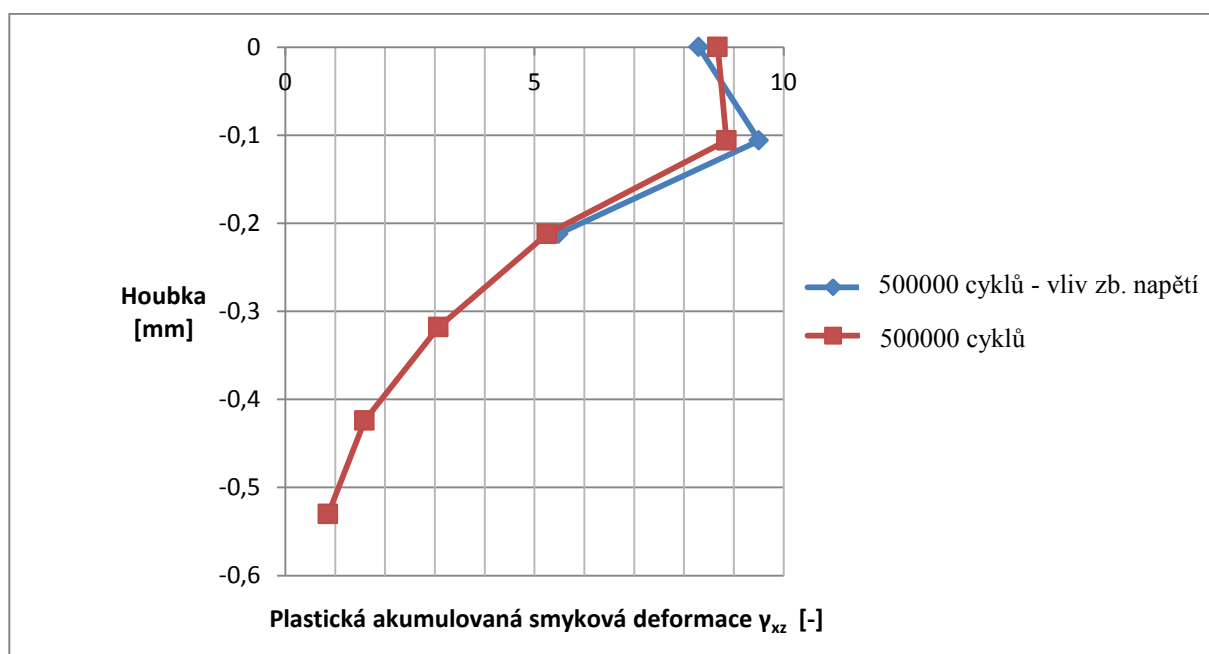
Tabulka 13 Materiálové parametry Chabocheova modelu

Materiálový parametr	Hodnota
C [MPa]	47234
γ [-]	2,684
σ_L [MPa]	334
$R_{\infty 1}$ [MPa]	23
b_1 [-]	0,018
$R_{\infty 2}$ [MPa]	44
b_2 [-]	0,012

Posléze byly realizovány dva výpočty úbytku poloměru, a to s plastickým napětovým polem s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí pro 500000 cyklů. V obou případech byl zároveň stanoven deformační profil. Tabulka 14 obsahuje výsledky výpočtu úbytku poloměru s plastickým napětovým polem s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí. Z výsledků je zcela evidentní pozitivní vliv tlakových zbytkových napětí na míru úbytku poloměru, který byl v případě plastického výpočtu bez uvážení zbytkových napětí vyšší o 0,21 mm. Srovnáme-li tvar deformačního profilu (Graf 10), můžeme říci, že v obou případech dochází k relativně shodnému trendu akumulace plastické smykové deformace v podpovrchových vrstvách.

Tabulka 14: Porovnání úbytků poloměru pro tři různé přístupy po 500 000 absolvovaných cyklech

Úbytek poloměru h_w [mm]		
Extrapolovaná data z experimentu	Výpočet s plastickým napětovým polem bez vlivu zbytkových napětí	Výpočet s plastickým napětovým polem s vlivem zbytkových napětí
0,56	0,84	0,53



Graf 10: Deformační profil po 500000 cyklech pro výpočet s plastickým napětovým polem s vlivem a bez vlivu zbytkových napětí

11 Závěr

Disertační práce se zabývá predikcí ratchetingu v oblasti kontaktní únavy pro případ liniového kontaktu. Pro uvedené účely byl zvolen ratchetingový model A. Mazzu [10], který vyniká svou jednoduchostí a časovou efektivitou, která se pro případ miliónu cyklů a sedmdesáti definovaných hladin, sloužících k predikci plastické smykové deformace, pohybuje v řádu sekund. Autorem disertace byl uvedený model v první fázi naprogramován v jazyce APDL (Ansys Parametric Design Language). Z důvodu vyšších nároků kladených na výpočtové úlohy a vzhledem k značným výhodám objektového programování byl algoritmus posléze autorem disertace přepsán do jazyka C#.

Cílem disertace bylo, nejen uvedený algoritmus na autorově pracovišti uvést do plně provozuschopného stavu, ale také ověřit jeho použití u reálných případů a dostupných experimentálních zkoušek. Výsledky experimentů mimo jiné poukazují na značný vliv kvality povrchu na míru opotřebení, kdy vzorky s nižší hodnotou drsnosti stykové plochy vykazují nižší opotřebení jak ve formě úbytku hmotnosti, tak i úbytku průměru. Experimenty rovněž prokázaly malý vliv historie zatěžování na parametry opotřebení kontaktního povrchu. Po ověřovací fázi pro různé případy numerických simulací, uvedených v literatuře

[9] bylo nutné navrhnout novou metodiku, která by byla oproti metodice navržené Donzellou a kol. [1] časově i finančně přijatelnější. Na základě množství dostupných experimentálních dat na autorově pracovišti byl použit inverzní přístup identifikace materiálových parametrů, kdy je na základě známých hodnot opotřebení pro zvolené počty cyklů hledána vhodná kombinace materiálových parametrů Chabocheova modelu tak, aby se při výpočtu pro daný počet cyklů co nejvíce přiblížily určené referenční hladině úbytku poloměru.

I přes jednoduchý princip ve formě implementovaného generátoru náhodných čísel se inverzní algoritmus ukázal jako účinný nástroj pro identifikaci materiálových parametrů. Vzhledem k velmi malé časové náročnosti predikce opotřebení i pro statisíce cyklů (řádově v sekundách) není problém větší počet nutných iterací pro nalezení optimálních hodnot materiálových parametrů.

V další části byl Mazzuův algoritmus spolu s navrženým inverzním algoritmem použit k identifikaci a následnému stanovení úbytku poloměru pro zadané počty cyklů a dané zátěžné podmínky (kapitola 6.6). Výsledky poukázovaly na velice dobrou korelaci mezi extrapolovanými experimentálními daty a numerickými výpočty. Při analýze deformačního profilu jsme došli ke stabilizovanému profilu po řádově statisících cyklech. Tento fakt plně koresponduje s [1]. V závěrečné kapitole se autor disertace věnuje aplikační fázi algoritmu pro dva případy v oblasti kontaktní únavy pro případ liniového kontaktu.

V prvním případě se jedná o zjišťování korelace mezi velikostí parametru σ_L (má charakter meze kluzu) a výší maximálního kontaktního tlaku p_0 . Na základě dostupných dat a provedených numerických simulací byla zjištěna téměř lineární závislost mezi těmito dvěma veličinami. Druhý příklad se věnuje studiu vlivu zbytkových napětí na velikost úbytku poloměru pro konkrétní zátěžné podmínky. Tato studie byla prezentována na mezinárodní konferenci v Hyannisu v roce 2012 [39] a potvrzuje pozitivní vliv tlakových zbytkových napětí na ratcheting a opotřebení funkčního povrchu součástí podrobených valivému kontaktu s prokluzem.

12 Přínos disertační práce a možnosti dalšího rozvoje

Hlavním přínosem předložené disertační práce je uvedení publikovaného Mazzuova algoritmu do plně provozuschopného stavu na autorově pracovišti a následná aplikace na vybrané případy z oblasti kontaktní únavy pro případ liniového kontaktu dvou zakřivených těles. Algoritmus byl autorem nejen ověřen na řadě experimentálních dat, a to zejména týkající se materiálu R7T hojně využívaného k výrobě železničních dvojkolí, ale také byl navržen a posléze ověřen nový způsob identifikace, než který je použit Donzellou a kol. v literatuře [1]. Předložený algoritmus nám nejen umožňuje stanovit úbytek poloměru pro konkrétní zátěžné podmínky, ale také, a to zejména, umožňuje analyzovat a posuzovat evoluci akumulace plastické smykové deformace pod kontaktním povrchem.

Přes tyto všechny výhody autor vidí možnost nalezení efektivnějšího způsobu identifikace materiálových parametrů pro použitý Chabocheův model cyklické plasticity. V našem případě je využíván Inverzní algoritmus s implementovaným generátorem náhodných čísel. Tento způsob identifikace vedl v našem případě k dosažení optimálních výsledků, jednalo se nicméně o proces časově náročný s nemožností předvídat délku trvání procesu. I přes povahu úlohy, kdy je prakticky nemožné použití gradientních metod, by byla vhodná hlubší analýza problému se zaměřením na fixaci určitých materiálových parametrů Chabocheova modelu s cílem použít určitých typů gradientních metod.

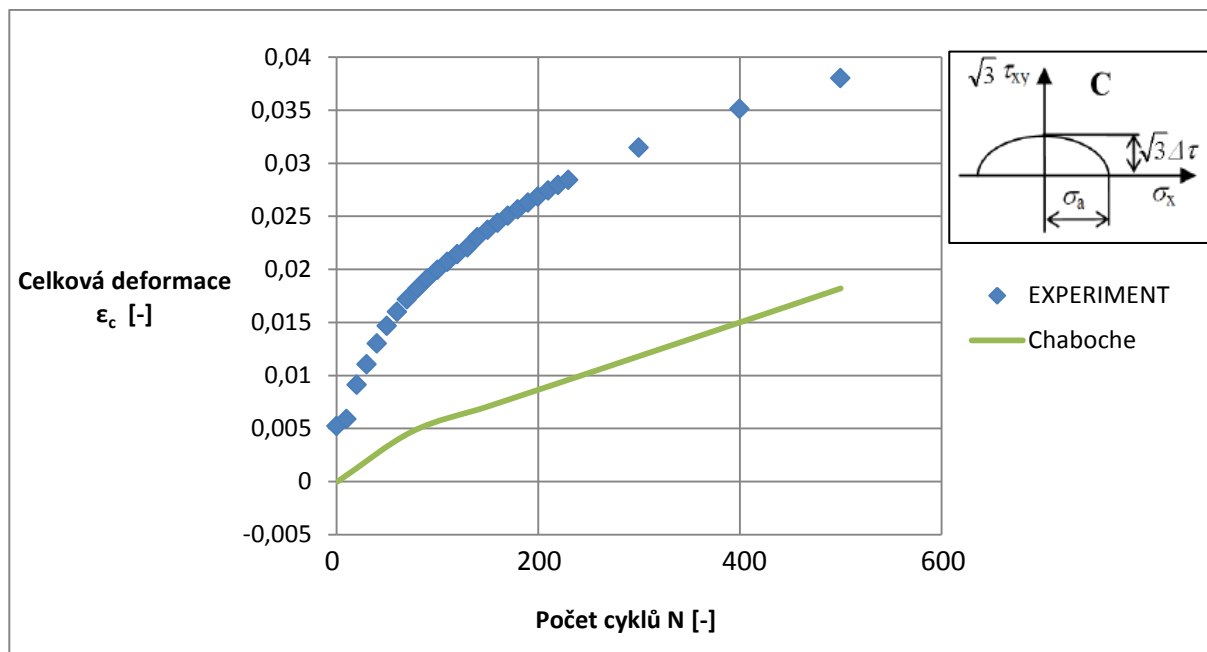
Autor se rovněž zabýval otázkou identifikace materiálových parametrů Chabocheova modelu plasticity prostřednictvím multiaxiálních únavových testů. Pro ukázkou budou prezentovány výsledky simulace multiaxiálního ratcheting testu provedeného u materiálu R7T (kombinace střídavého tahu-tlaku a míjivého krutu, zátěžná cesta viz Graf 11), který odpovídá neproporcionálnímu namáhání bodu na povrchu tělesa zatíženého valivým kontaktem [25]. Hodnoty materiálových parametrů byly použity z kapitoly 7.2 v disertační práci, s pomocí kterých byly i mimo jiné realizovány numerické simulace, týkající se vlivu zbytkových napětí na míru ratchetingu [39].

Graf 11, uvedený na následující straně, obsahuje výsledky celkové smykové deformace z experimentu a numerické simulace multiaxiálního ratcheting testu. Z grafu je evidentní shodný trend akumulace plastické smykové deformace v případě výsledků numerického výpočtu v porovnání s experimentálními daty. Tento výsledek poukazuje na možnost ladění parametrů nutných pro Mazzův model na základě uvažovaného ratcheting testu, nikoliv na základě hmotnostních úbytků zjištěných zkouškou valivého kontaktu. Jedná se o velmi zajímavé zjištění pro pracoviště, která nedisponují speciálním zkušebním zařízením pro výzkum kontaktní únavy, ale mají multiaxiální pulsátor.

V tomto ohledu by tedy bylo přínosné se danou problematikou v budoucnu podrobněji zabývat. Díky realizovaným experimentům, z nichž některé jsou v předložené práci publikovány, bylo možné prozkoumat vliv kvality povrchu stykové plochy na míru opotřebení, či vliv historie zatěžování na hmotnostní úbytek resp. úbytek poloměru.

V technické praxi se v daleko častější míře setkáváme s problematikou bodového kontaktu. Jedním z dalších námětů pro hlubší studii by tedy nepochybně byla otázka použitelnosti modifikovaného Mazzuova algoritmu u tohoto typu kontaktu. Autor disertace již v tomto ohledu zahájil přípravnou fázi, ve které vytvořil v jazyce APDL makro, které umožňuje

generovat kompletně parametrický model dvou bombírovaných vzorků, u kterých je posléze možné analyzovat napětové pole v trojdimenzionálním prostoru s využitím kartézských souřadnic.



Graf 11: Porovnání míry ratchetingu pro případ experimentu a numerické simulace

13 Seznam použité literatury

- [1] DONZELLA G., FACCOLI M., MAZZU A., PETROGALLI C., ROBERTI R.: *Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact*, Wear 271, 2011, p. 408-416.
- [2] TYFOUR W.R., BEYNON J.H., KAPOOR A.: The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions, Wear 180, 1995, p. 79–89.
- [3] FLETCHER D.I., BEYNON J.H.: *Equilibrium of crack growth and wear rates during unlubricated rolling-sliding contact of pearlitic rail steel*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F 214, 2000, p. 93–105.
- [4] TYFOUR W.R., BEYNON J.H., KAPOOR A.: Deterioration of rolling contact fatigue life of pearlitic rail due to dry-wet rolling–sliding line contact, Wear 197, 1996, p. 255–265.
- [5] KAPOOR A., FRANKLIN F.J.: *Tribological layers and the wear of ductile materials*, Wear 245, 2000, p. 204–215.
- [6] RINGSBERG J.W.: *Shear mode growth of short surface-breaking RCF cracks*, Wear 258, 2005, p. 955–963.
- [7] MERWIN J.E., JOHNSON K.L.: *An analysis of plastic deformation in rolling contact*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 177 (25), 1963, p. 676–685.
- [8] BOWER A.F., JOHNSON K.L.: *The influence of strain hardening on cumulative plastic deformation in rolling and sliding line contact*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 37, 1989, p. 471–493.
- [9] MAZZU A.: A simplified non-linear kinematic hardening model for ratcheting and wear assessment in rolling contact, Journal of Strain Analysis 43 (5), 2008, p. 349–360.
- [10] MAZZU A.: Surface plastic strain in contact problems: prediction by a simplified non-linear kinematic hardening model, Journal of Strain Analysis 44 (3), 2009, p. 187–199.
- [11] XIA L., XUESONG J., ZEFENG W., DABIN C., WEIHUA, Z.: *A new integrated model to predict wheel profile evolution due to wear*, Wear, 271, 2011, p. 227-237.
- [12] BRAGHIN F., LEWIS R., DWYER-JOYCE R.S., BRUNI S.: A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear, Wear 261, 2006, p. 1253-1264.
- [13] TASSINI N., QUOST R., LEWIS R., DWYER-JOYCE R., ARIAUDO C., KUKA N.: *A numerical model of twin disk test arrangement for the evaluation of railway wheel wear prediction methods*, Wear 268, 2010, p. 660-667.
- [14] VUONG T.T., MEEHAN P.A., EADIE D.T., OLDKNOW K. , ELVIDGE D., ELLETTE P.A., DANIEL W.J.: Investigation of a transitional wear model and wear-type rail corrugation prediction, Wear 271, 2011, p. 287-298.
- [15] FRANKLIN F.J., KAPOOR A.: *Modeling wear and crack initiation in rail*, Proc. IMechE 221, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2006, p. 23-33.

- [16] HALAMA R.: *Řešení elastoplastické napjatosti v bodovém styku dvou zakřivených těles pomocí MKP*, Disertační práce v oboru Aplikovaná mechanika, FS VŠB-TUO, Ostrava, 2005, 130 s.
- [17] HALAMA R., FAJKOŠ R., MATUŠEK P., BÁBKOVÁ P., FOJTÍK F., VÁCLAVEK L.: *Contact defects initiation in railroad wheels – Experience, experiments and modeling*, Wear 271, 2011, p. 174-185.
- [18] HALAMA R.: *Experimentální poznatky a fenomenologické modelování cyklické plasticity kovů*, Habilitační práce v oboru Aplikovaná mechanika, FS VŠB-TUO, Ostrava, 2009, 141s.
- [19] ROJÍČEK J.: *Statické hypotézy pevnosti*, Disertační práce v oboru Aplikovaná mechanika, FS VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 141 s.

Seznam vlastní literatury

- [20] ŠOFER M.: *Koncepční návrh úprav zkušebního stroje pro výzkum kontaktní únavy*, Diplomová práce v oboru Aplikovaná mechanika, VŠB-TUO, Ostrava, 2009, 49 s.
- [21] HALAMA R., VÁCLAVEK P., FOJTÍK F., ZUBAL L., ŠOFER M.: *Experimentální stanovení odolnosti proti opotřebení a výzkum iniciační fáze defektů při valivém kontaktu u materiálu R7T*, Technická zpráva č. 01-09 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [22] HALAMA R., MACURA P., FOJTÍK F., ZUBAL L., ŠOFER M., HRABEC J.: *Měření zbytkových napětí při kontaktní únavě s prokluzem 0,75%*, Technická zpráva č. 02-09 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [23] HALAMA R., MACURA P., FOJTÍK F., ZUBAL L., ŠOFER M., HRABEC J.: *Zapojení katedry pružnosti a pevnosti do projektu MPO v roce 2009*, Technická zpráva č. 03-09 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009.
- [24] HALAMA R., BÁRTA P., ŠOFER M.: *Numerická analýza vlivu zbytkových napětí a aplikace lomové mechaniky v úloze valivého kontaktu*, Technická zpráva č. 4 projektu s názvem: Experimentální a numerické modelování s aplikací na železniční a automobilový průmysl, identifikační kód: SP/2010171, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [25] HALAMA R., SEDLÁK J., FOJTÍK F., ŠOFER M., TAŠEK H.: *Simulace vybraných zkoušek nízkocyklové únavy materiálu R7T*, Technická zpráva č. 01-10 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010.

- [26] MACURA, P.; FOJTÍK, F.; HALAMA, R.; ŠOFER, M., Experimental analysis of roll bandages for rolling mills, sborník vědeckých prací FS VŠB-TUO, No. 1, vol.LVI, Ostrava 2010.
- [27] ŠOFER M., HALAMA R., FOJTÍK F., VÁCLAVEK L., Rolling contact fatigue research on VŠB-TUO, comparison of current test machine with its new concept, sborník 1. ročníku konference: New methods of damage and failure analysis of structural parts, Ostrava, 2010, s. 153-158, ISBN 978-80-248-2265-5
- [28] ŠOFER, M.; HALAMA, R., *Mechanismy opotřebení*, Dílčí zpráva č. 3, Projekt: Experimentální a numerické modelování s aplikací na železniční a automobilový průmysl, č. projektu: SP/2010171, VŠB-TUO, Ostrava 2010
- [29] HALAMA R., MACURA P., VÁCLAVEK L., FOJTÍK F., ZUBAL L., ŠOFER M.: *Experimentální stanovení vlivu velikosti kontaktního tlaku na opotřebení a iniciační fázi defektů při valivém kontaktu u materiálu R7T*, Technická zpráva č. 11-003-1-010 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [30] ŠOFER, M.; HALAMA, R.; SEDLÁK, J., *Semi-analytical approach for wear assessment in rolling contact*, sborník 13. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Velké Bílovice, 2011, s. 219-222, ISBN 978-80-87434-03-1
- [31] HALAMA, R.; ŠOFER, M.; SEDLÁK, J., *A model for cyclic hardening and ratchetting description and its implementation*, sborník 13. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Velké Bílovice, 2011, s. 59-62, ISBN 978-80-87434-03-1
- [32] HALAMA R., ROJÍČEK J., ŠOFER M., SEDLÁK J., TAŠEK H., HRABEC J.: *Numerické a semianalytické simulace vybraných testů materiálu R7T*, Technická zpráva č. 11-003-1-011 projektu s názvem: Zkušební metody a modely predikce životnosti pro zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dvojkolí, identifikační kód: 2A-3TP1/110, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011.
- [33] HALAMA, R.; ŠOFER, M.; FOJTÍK, F., *Calibration of cyclic plasticity model with regard to subsequent fatigue analysis*, sborník 13. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Velké Bílovice, 2011, s. 63-66, ISBN 978-80-87434-03-1
- [34] SEDLÁK, J.; HALAMA, R.; ŠOFER, M., *Verification of predictive ability of simple hardening models of Chaboche type*, sborník 13. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Velké Bílovice, 2011, s. 187-190, ISBN 978-80-87434-03-1
- [35] ŠOFER, M.; HALAMA, R.; SEDLÁK, J., *Semi-analytical approach for wear assessment in rolling contact*, sborník 13. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Velké Bílovice, 2011, s. 219-222, ISBN 978-80-87434-03-1
- [36] HALAMA, R.; ŠOFER, M.; FOJTÍK, F., *Choice and calibration of cyclic plasticity model with regard to subsequent fatigue analysis*, Engineering MECHANICS 19, 2012, No. 2/3, p. 87-97.

- [37] FOJTÍK, F.; HALAMA, R.; FUXA, J; ŠOFER, M., *Teaching innovation by introducing laboratory of mechanical properties of modern materials and defectoscopy*, sborník 14. ročníku konference: Aplikovaná Mechanika, Plzeň, 2012, s. 37-40, ISBN 978-80-261-0097-3
- [38] HALAMA, R.; SEDLÁK, R.; ŠOFER, M., *Phenomenological Modelling of Cyclic Plasticity*, Numerical Modelling, Dr. Peep Miidla (Ed.), 2012, ISBN: 978-953-51-0219-9
- [39] HALAMA R., ŠOFER M., FOJTÍK F. ROJÍČEK J., KOLAŘÍK K.: *Residual Stresses in Rolling Contact Fatigue and Its Influence on Ratcheting and Wear*, 9. ročník konference: International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials, 16 - 21. Zář 2012, Hyannis, USA, Sborník abstraktů [CD-ROM]

Spoluúčast na tvorbě funkčních vzorků

- [40] VŠB-TU OSTRAVA, KATEDRA PRUŽNOSTI A PEVNOSTI. Přípravek pro výzkum kontaktní únavy při konstantním prokluzu. Původce vynálezu: FIALA, Antonín; VÁCLAVEK, Leo; HALAMA, Radim; FOJTÍK, František; ŠOFER, Michal. Funkční vzorek e.č. 210/22-12-2011_F.. Centrum transferu technologií VŠB-TU Ostrava.
- [41] VŠB-TU OSTRAVA, KATEDRA PRUŽNOSTI A PEVNOSTI. Přípravek pro výzkum kontaktní únavy při sekvenčním brzdění. Původce vynálezu: FIALA, Antonín; VÁCLAVEK, Leo; ŠOFER, Michal. Funkční vzorek e.č. 209/22-12-2011_F, Centrum transferu technologií VŠB-TU Ostrava.
- [42] VŠB-TU OSTRAVA, KATEDRA PRUŽNOSTI A PEVNOSTI. Přípravek pro výzkum kontaktní únavy při konstantní zátěži. Původce vynálezu: ŠOFER, Michal; STAŠ, Peter; HALAMA, Radim. Funkční vzorek e.č. 211/22-12-2011_F, Centrum transferu technologií VŠB-TU Ostrava.

14 Conclusions

Presented Ph.D. thesis deals with ratcheting prediction in the field of contact fatigue for the case of line contact. For the stated purposes, the wear model proposed by A. Mazzu is used, which stands out for its simplicity and time efficiency. For example, in the case of simulating millions of cycles and seventy-defined levels, the computation is realized within a few seconds. In the first stage, the entire algorithm has been written in APDL program language (Ansys Parametric Design Language). However afterwards, it was due to the higher efficiency and the possibility of its extension rewritten into C # program language, where takes full advantage of object-oriented programming.

The aim of the thesis was not only put the given algorithm on the author's workplace into a fully operational condition, but also validate its use in real cases and on available experimental tests, which are described in chapter 5.3. The experimental results indicate the significant influence of surface quality on wear rate, where samples with a lower value of the contact surface roughness exhibit less wear both in the form of weight loss, and loss of diameter. Experiments also showed small effect of loading history on wear parameters of contact surface.

After the validation phase for different cases of numerical simulations, listed in [10], it was necessary to propose a new methodology for material parameter's identification that will be in contrast to the methodology proposed by Donzella et al. [1] both time and financially more acceptable. For these purposes, author has used inverse approach, for the stated values of wear rates with corresponding number of cycles we are looking for a suitable combination of material parameters for Chaboche plasticity model in order to obtain the best possible conformity with the stated values of wear rates as well as with corresponding number of cycles.

Despite the simple principle in the form of an implemented random number generator, the inverse algorithm has been shown as an effective tool for identification of material parameters. Due to a very small time demands on the ratcheting prediction, even for a hundreds of thousands of cycles, there is no problem to undergo higher number of iterations, required to find the optimal values of material parameters. In the next section, the Mazzu's approach and the inverse algorithm have been used to evaluate the wear rates for stated numbers of cycles (chapter 6.6). The results showed very good correlation between the extrapolated experimental data and numerical calculations. When analyzing the deformation profile, we came to stabilized deformation profile after the hundreds of thousands of cycles, this fact fully corresponds with [1]. In the final chapter, the author of proposed thesis deals with the application phase of the algorithm for two cases from different area of interest.

In the first case, we are trying to find the correlation between the value of the yield stress σ_L and the value of the maximum contact pressure p_0 . Based on available experimental data and performed numerical simulations, there has been found almost linear relationship between these two variables.

The second example is devoted to the study of the influence of residual stresses on the wear rate for particular loading conditions. This study has been presented at the international conference in Hyannis in 2012 [61] and confirms the positive effect of compressive residual stresses on wear rate of the surface subjected to rolling contact with particular slip.

Curriculum vitae

Ing. Michal Šofer

Osobní údaje

Datum narození : 26. květen 1984
Místo narození: Opava
Národnost: česká

Vzdělání

2009	VŠB – TU Ostrava – doktorské studium na Fakultě strojní, obor Aplikovaná mechanika
2003 – 2009	VŠB – TU Ostrava – inženýrské studium na Fakultě strojní, obor Aplikovaná mechanika
1999 – 2003	Gymnázium Josefa Kainara v Hlučíně
Státní doktorská zkouška:	Teorie plasticity, Mechanika kontinua, Numerické metody
Státní zkouška:	Teorie pružnosti, Aplikovaná dynamika, Technická měření a experimentální metody
Diplomová práce:	Koncepční návrh úprav zkušebního stroje pro výzkum kontaktní únavy

Personal data

Date of birth: May 26th, 1984
Place of birth: Opava, Czech Republic
Nationality: Czech

Education

2009	VŠB – TU Ostrava – Ph.D. study, Faculty of Mechanical Engineering, field of study: Applied mechanics
2003 – 2009	VŠB – TU Ostrava – M.Sc. study, Faculty of Mechanical Engineering, field of study: Applied mechanics
1999 – 2003	Grammar school in Hlučín
State examination of Ph.D.:	Theory of Plasticity, Continuum Mechanics, Numerical Methods
State examination:	Theory of Elasticity, Applied Dynamics, Technical Measurements and Experimental Methods
Diploma thesis:	Concept of Modification of Test Machine for Rolling Contact Fatigue Research